

**Aprovechamiento energético mediante cogeneración de biogás obtenido del lacto
suero**

Natalia Milena Botero Penagos

Cesar Naranjo Peñuela

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de medio ambiente.
Ingeniería ambiental
Bogotá, Colombia.
2020**

**Aprovechamiento energético mediante cogeneración de biogás obtenido del lacto
suero**

Cesar Naranjo Peñuela

Natalia Milena Botero Penagos

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero ambiental

Director (a):

MEng. MSc. Luis Alejandro Duarte Rodríguez

Línea de investigación: Gestión y Manejo Ambiental

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Ingeniería ambiental

Bogotá, Colombia

(Dedicatoria)

A Dios por permitirme avanzar cada día.

*A mis padres por su apoyo incondicional en cada
paso, por cada palabra de aliento y motivación que
me han brindado en cada fase de mi vida.*

*A mi hija por ser mi motor y mi inspiración por
Comprender y apoyar cada momento bueno o
De dificultad que ha sucedido.*

(Dedicatoria)

*Gracias a Dios y a la vida por sorprenderme y
permitirme continuar mis estudios y cerrar un nuevo ciclo.*

A mi Madre y hermana por su apoyo absoluto,

*A mi hermosa hija gracias por
ser mi motivación e iluminar mis días.*

*A mis amigos que estuvieron
cerca para darme su ánimo y
consejos generando optimismo.*

*A mi compañera de trabajo Natalia,
por su compromiso y entereza,
así mismo a todos los que tuvieron
parte en este proceso.*

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, a la ECAPMA y su grupo de docentes por su compromiso y apoyo, por permitirnos y brindarnos todas las herramientas necesarias que nos permitieron avanzar en nuestro aprendizaje profesional.

A nuestro Director, el profesor Luis Alejandro Duarte Rodríguez por su paciencia y apoyo siempre que lo necesitamos, por su contribución en la construcción de nuestro trabajo de grado mediante sus observaciones.

Resumen

El suero de la leche es considerado uno de los subproductos más contaminantes de la industria alimentaria, el vertimiento directo por parte de empresas lácteas genera impactos negativos al recurso hídrico alterando la composición fisicoquímica del agua por su alto contenido de lactosa, una DBO que varía entre 30,000 a 50,000 mg/L, además de la gran cantidad de ácido láctico (Parra, R, 2010). La descomposición de esta materia orgánica adicionalmente incrementa el volumen de emisiones de (GEI) gases de efecto invernadero de la pequeña y mediana industria láctea colombiana, de los ya generados por los procesos térmicos artesanales y/o convencionales empleados al interior de las mismas.

En el presente trabajo, se hace un breve recuento histórico de la evolución y uso de los biodigestores. Esta tecnología ha sido perfeccionada con el paso de los años. Tanto en el contexto mundial como nacional, su uso además de representar beneficios en costos por ahorro de energía (autogeneración), constituye una alternativa para mitigar los impactos negativos sobre las matrices agua, suelo y aire. Con este trabajo se abre la posibilidad de recoger algunas experiencias de países desarrollados, a fin de que puedan ser aplicadas a escala de PYMEs Colombianas en zonas de marcada producción lechera como es el caso de Cundinamarca. Los grandes volúmenes de suero lácteo provienen del proceso de elaboración del Queso en todas sus variedades; esta Biomasa sometida a un proceso de biodegradación produce biogás, mezcla de varios gases, principalmente Dióxido de carbono (CO_2) y Metano (CH_4), compuestos que son de gran utilidad, entre ellos la generación de energía.

De la adecuada selección tecnológica del sistema de biodigestión y del manejo de factores físicos y químicos, entre otros, depende su óptimo aprovechamiento. De acuerdo a esto, en el presente trabajo se ilustran algunos de los sistemas más usados actualmente en la industria láctea. Ligado a la producción de Biogás, se exploran varios métodos de generación energética y otros usos del CH_4 y del CO_2 , así como procesos de captura y compresión de estos gases que pueden ser luego liberados a fin de ser usados en algún momento en las PYMEs lecheras para alguna aplicación particular y de interés.

Este trabajo busca contextualizar la existencia de grandes dificultades, pero también desafíos en la gestión ambiental de las empresas del sector lácteo colombiano, y apunta a la necesidad de avanzar en la implementación de alternativas técnicas para la generación y autoabastecimiento energético, dejando evidencias de casos internacionales posiblemente aplicables a regiones de producción quesera como es el caso de Cundinamarca.

Palabras clave: Biogás, Energía alternativa, lactosa, lacto suero, biomasa, autogeneración, ácido láctico.

Abstract

Dairy whey is considered one of the most polluting by-products in the food industry, direct dumping by dairy companies generates negative impacts on the water resource, altering the physicochemical composition of the water due to its high lactose content, a BOD that varies between 30,000 to 50,000 mg/L, in addition to the large amount of lactic acid. (Parra, R, 2009). The decomposition of this organic matter additionally increases the volume of greenhouse gas (GHG) emissions from the Colombian small and medium dairy industry from those already generated by artisanal and / or conventional thermal processes used within them.

Since just over two centuries ago the first biodigesters were created, this technology has been perfected over the years. Both in the global and national context in the use of biodigesters, in addition to representing cost benefits for energy savings (self-generation), constitutes an alternative to mitigate the negative impacts on the water, soil and air matrices; It is possible that some experiences from developed countries can be applied at the level of Colombian SMEs in areas of marked milk production, such as Cundinamarca. The large volumes of dairy whey come from the cheese making process in all its varieties; This Biomass is subjected to a transformation process that produces biogas, a mixture of various gases, mainly Carbon Dioxide (CO₂) and Methane (CH₄) compounds that are of great service, including energy cogeneration.

Optimal use depends on the appropriate technological selection of the biogas system and the management of physical and chemical factors, among others, which is why some of the most commonly used systems in the dairy industry will be illustrated. Linked to the production of Biogas, various methods of energy generation and other uses of CH₄ and CO₂ are explored, as well as processes of capture and compression of these gases that can be suggested in order to be used in dairy SMEs.

This work seeks to contextualize the existence of great difficulties, but also challenges in the environmental management of companies in the Colombian dairy sector,

and points to the need to advance in the implementation of technical alternatives for energy self-generation, leaving evidence of international cases possibly applicable to cheese production regions such as Cundinamarca.

Keywords: Biogas, Alternative Energy, lactose, lactose serum, biomass, self-generation, lactic acid.

Tabla de contenido

Agradecimientos	V
Resumen	VI
Abstract	VIII
Lista de ilustraciones	XIII
Lista de tablas	XIV
Lista de elementos y unidades	XV
Introducción	2
Generalidades	8
Estado del arte de la investigación.....	8
Objetivos	11
Capítulo 1. La industria láctea	12
1.1. Industria láctea en Colombia	12
1.1.1. Localización.....	12
1.2 Marco regulatorio en el país	14
1.3 Proceso de obtención del lactosuero.....	16
1.3.1 Procesos lácteos.....	17
1.3.2 Usos del lactosuero	20
1.4 Proceso productivo del queso.....	22
Capítulo 2. Proceso de digestión del suero	25
2.1. Digestión anaerobia del lactosuero:	25
2.2 Nutrientes necesarios para la digestión anaerobia	28
2.3 Beneficios de la digestión anaerobia	29
2.4 Biodigestores más usados en la industria láctea, procesos y variables para la generación de biogás	29
2.4.1 Biogás	29
2.4.1 Biogás a partir del suero de la leche	30
2.5 Digestores.....	31
2.5.1 Componentes de un digestor anaeróbico.....	31
2.5.2 Configuraciones de un biodigestor anaeróbico	31
2.6 Tecnologías de los biodigestores	32

2.6.1. Biodigestor tipo UASB	33
2.6.2 Biodigestor tipo CSTR.....	35
2.6.3. Biodigestor tipo UAF	36
2.7 Factores asociados a la productividad del biodigestor	38
2.7.1 Parámetros matemáticos	38
2.7.2. Factores químicos	39
2.7.3 Factores físicos	40
2.8 Condiciones para la viabilidad de un proyecto de biogás.....	41
2.8.1 Sustrato adecuado.....	42
2.8.2 Posibilidad de utilizar co-sustratos o combinación de los mismos:	43
2.8.3 Escala	44
Capítulo 3. El biogás, almacenamiento y captura	44
3.1 Biogás y sistemas de biogás	44
3.2 Sistemas de generación de energía a partir de CH ₄ y usos del CO ₂	45
3.3 Biometano – Otras formas de aprovechamiento en la industria.....	45
3.3.1 Combustión- producción de calor o vapor.....	45
3.3.2. Generación de energía eléctrica y/o calor.....	46
3.3.3. Integración a la red de gas natural	46
3.3.4 Combustible para vehículos.....	46
3.3.5 Celdas o pilas de combustible.....	47
3.4 Compresión de CH ₄ para comercialización.....	48
3. 5. Aplicaciones del CO ₂	49
3.5.1. Refrigeración	50
3.5.2 Métodos de captura del CO ₂	51
Capítulo 4. Recomendaciones para Colombia	53
4.1 Experiencia industrial de generación de biogás en Colombia	53
4.2 relación del caso colombiano y la generación de biogás en el mundo.....	55
4.3 Posibilidades del sector lácteo colombiano.....	58
5. Conclusiones y recomendaciones	62
5.1 Conclusiones	62
5.2 Recomendaciones	64

Bibliografía.....	65
--------------------------	-----------

Lista de ilustraciones

	Pág.
Ilustración 1. Mapa del sector lácteo Colombiano.....	13
Ilustración 2. Elaboración de queso	24
Ilustración 3. Modelo de un biodigestor	25
Ilustración 4. Proceso de digestión anaerobia.....	27
Ilustración 5. Reactor anaeróbico UASB.....	34
Ilustración 6. Reactor industrial tipo tanque agitado- CSTR.....	36
Ilustración 7. Reactor tipo UAF.....	37

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Composición de las aguas residuales del sector lácteo5

Tabla 2. Composición de lactosuero dulce y ácido. 17

Tabla 3. Características generales del biogás 30

Tabla 4. Comparación de digestión anaerobia de lactosuero de los biodigestores en su estado de mayor productividad. 38

Lista de elementos y unidades

Compuestos químicos

Símbolo	Nombre	formula
<i>CH₄</i>	Metano	CH ₄
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono	CO ₂
<i>NO_x</i>	Óxidos de nitrógeno	NO _x
<i>SO</i>	Óxidos de azufre	SO
<i>CO</i>	Monóxido de carbono	CO
<i>H₂</i>	Hidrogeno	H ₂
<i>H₂S</i>	Ácido sulfhídrico	H ₂ S

Unidades de energía y potencia

Símbolo	Nombre	Equivalencia
<i>KW</i>	Kilovatio	10 ³ w
<i>MW</i>	Megavatio	1.000.000w
<i>GWH</i>	Gigavatio/hora	1 ⁹ w

Unidades de volumen

Símbolo	Nombre	Equivalencia
<i>m³/L</i>	Metro cúbico sobre litro	1 m ³ =1.000L
<i>mg/L</i>	Miligramo sobre litro	Miligramos por litro
<i>L/ton</i>	Litro sobre tonelada	1.10231131×10-6m ³ / kg

Unidades de masa

Símbolo	Nombre	formula
<i>m³/kg</i>	Metro cúbico sobre kilogramo	0,001gr/cm ³
<i>Kg/ton</i>	Kilogramo sobre tonelada	1kg=0,00110231Ton

Lista Abreviaturas

Abreviatura	Termino
DBO	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
GEI	Gases de efecto invernadero
PEMFC	Celdas de combustible de membrana de intercambio de protones
SOFC	Celdas de combustible de óxido sólido
PROURE	Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía TGDC
UPME	Unidad de Planeación Minero - Energética
PYMEs	Pequeñas y medianas empresas
ARI	Aguas residuales industriales
ARD	Aguas residuales domesticas
CER's	certificados de reducción de emisiones
MDL	Mecanismos de desarrollo limpio

Introducción

La energía es necesaria por varias razones; lo más básico e indiscutible implica la preparación de alimentos y provisión de calor para hacer la vida más cómoda. Posteriormente, una amplia gama de usos tecnológicos de la energía ha surgido, por lo que la disponibilidad de energía se ha convertido en un elemento de central preocupación; es por ello, que la ciencia hoy en día busca un aumento significativo en el uso de fuentes alternativas para la producción mayoritariamente de electricidad, así como para satisfacer otras necesidades energéticas de la sociedad humana industrial y comercial. (Huggins, R., 2016.)

El lactosuero se convierte en un sustrato valioso energéticamente por medio de las fases biológicas de fermentación, cuenta con un alto contenido de lactosa y a su vez un alto contenido de materia orgánica. Las alternativas de tratamiento dispuestas en las diferentes fases y los microorganismos utilizados se pueden emplear en procesos de fermentación para obtener etanol, la digestión anaerobia para producir biogás, la fermentación oscura para obtener hidrogeno o la combinación de las dos etapas para obtener hidrogeno y biogás. (Martínez, et al, 2016).

De acuerdo con Víquez, J, (2012), la producción de Biogás a partir del suero lácteo se puede considerar alta, estimándola teóricamente, con el índice de $0,35 \text{ m}^3$ de CH_4 por cada kg de DQO, destruido dentro de un biodigestor. En este caso, 1.000 L de suero podrían estar generando 36 m^3 de biogás, con 65% de metano, lo que equivale a 22 L de gasolina, aproximadamente.

Algunos estudios de Erguder (2001) y Mawson (1994), respectivamente, han reportado en la práctica 20 a 35 m^3 de biogás, por cada 1.000 L de suero, utilizando digestores de flujo ascendente. La demanda de fuentes de energía convencional como los

combustibles fósiles, ha obligado a través de políticas públicas a muchos países a implementar medidas que involucren la búsqueda y el desarrollo de nuevas tecnologías, estimulando a los sectores industriales con incentivos tributarios, en este sentido la industria láctea puede verse atraída por estos beneficios. Se estima que el procesamiento de 200.000 litros de leche, representa tratar 50.000 litros para la producción de quesos, que dejan libres cerca de 43.500 litros de suero, teniendo en cuenta que el suero es aproximadamente el 90% de volumen de leche, y considerando que la generación de energía es de 2 KWH/m³ de biogás con 70% de metano”. (Hernández F, 2018).

Las características del biogás lo hacen uno de los pocos vectores energéticos renovables que puede ser empleado tanto para generar electricidad, como para encargarse de la demanda energética en los sectores térmicos. De acuerdo con los factores de productividad del Biogás y los requerimientos de la industria, la obtención de biogás permite la cogeneración energética, que radica en obtener simultáneamente energía térmica y energía eléctrica. (Fundación Asturiana de energía FAEN, S.F). La promoción de la cogeneración, así como medidas de eficiencia energética en entornos no urbanos, en la transformación, transporte, distribución y participación de terceros en la oferta, formaran parte de la estrategia integral de eficiencia energética en el país. (PNIEC 2021-2030, 2019).

Actualmente en el país pequeñas y medianas empresas, generalmente desechan el suero de la leche, este subproducto es considerado uno de los más contaminantes que existen en la industria alimentaria; cuando este es vertido de forma directa a los desagües y redes de alcantarillado sin ningún tipo de tratamiento, se desencadenan impactos ambientales negativos, los vertimientos directos de las industrias, contaminan el recurso hídrico incluyendo los acuíferos y contaminan el suelo. Incluso las medianas empresas lácteas no cuentan con una adecuada gestión de disposición final del suero y su vertimiento constituye una pérdida significativa de potencial nutritivo y energético, además, se caracteriza por una alta concentración de DQO y DBO, que como se sabe representa alto contenido orgánico. (Parra, R, 2009).

El Manual de Producción y Consumo Sostenible, Gestión del Recurso Hídrico - Sector Lácteo (2016), afirma que “una industria quesera media que produzca diariamente 40.000 litros de suero sin depurar genera una contaminación diaria similar a una población de 1.250.000 habitantes; el lactosuero, dependiendo del tipo de coagulación, ya sea ácido o dulce, el contenido en lactosa y proteína origina un incremento alto del grado de contaminación de las aguas residuales. Estas altas cargas contaminantes no pueden ser tratadas con métodos conocidamente convencionales por lo tanto requieren una tecnología específica para su tratamiento. Esta es una de las razones para evitar el vertido del lacto suero junto con el resto de las aguas residuales, además la cantidad de ácido láctico presente en él, va a alterar significativamente los procesos biológicos que se llevan a cabo en las plantas de tratamiento municipales aumentando los costos de tratamiento, (Corrales, Antolinez, Bohórquez & Corredor, 2015).

Caracterización de la Problemática

Aguas residuales

De acuerdo con la Escuela Organización Industrial- Sevilla, (2008), las ARI que provienen de procesos de empresas lecheras presentan las siguientes características generales:

- Marcado carácter orgánico (elevada DBO₅ y DQO), debido a la presencia de componentes de la leche, que tiene una DBO₅ de 110.000 mg/l y una DQO de 210.000 mg/l.
- Alta biodegradabilidad.
- Presencia de aceites y grasas.
- Concentraciones elevadas de fósforo y nitrato que provienen de productos utilizados en la limpieza y desinfección de las plantas de producción.
- Sólidos en suspensión, principalmente en elaboración de quesos

- Alta conductividad (principalmente en las empresas queseras debido al vertido de cloruro sódico procedente del salado del queso).
- Valores puntuales de pH extremos, debidos a las operaciones de limpieza, donde se usan ácidos y bases.

Dichos valores y concentraciones se pueden observar en la tabla 1 del documento.

En el agua residual que proviene de la fabricación de quesos se aprecian grandes cantidades de lactosuero, sobre todo salino, incrementando la carga contaminante. Si la cantidad de materia orgánica del suero es lo suficientemente elevada, como normalmente se registra, el consumo de oxígeno puede llevar a su agotamiento, destruyendo comunidades acuáticas las cuales necesitan de este elemento para vivir. Además, el exceso de materia orgánica posibilita la proliferación de microorganismos, el déficit de oxígeno aumenta la solubilidad en el agua de ciertos metales. (García, B, 2018).

Tabla 1. Composición de las aguas residuales del sector lácteo Federación nacional de industrias láctea, Escuela organización industrial, Sevilla (2008) p.11

Parámetro	Leche de consumos	Quesos	Derivados lácteos	Helados
Ph	8.5	6.9	8.5	8
DQO (mg/l)	1.775	4.500	4.000	925
DBO5 (mg/l)	1.050	2.750	1.750	620
Sólidos en suspensión (mg/l)	435	850	825	425
Fosforo	20	35	6.25	5.5
NTK	65	100	100	75
Conductividad	1.650	3.250	1.250	1.200
Cloruros	140	220	100	135
Nitratos	50	105	90	75
Nitritos	10	35	0.2	0.3
Aceites y grasas (mg/l)	105	365	110	25
Detergentes	3.5	7	7.5	6

De acuerdo con Prado, D. “la falta de conocimiento del productor respecto a la normatividad ambiental de vertimientos, contribuye al deterioro agudo del ambiente físico -biótico y social, aguas abajo del sitio de producción “. (2013).

Residuos Sólidos

Por otra parte, los residuos sólidos de las empresas de fabricación de quesos también causan impacto negativo, pues se estima que en la actividad de producción del queso se desechan restos de cuajada cuando se separa el suero lácteo, creando más residuos orgánicos. Los residuos inorgánicos que se generan provienen de las etapas finales del proceso, envasado, empacado y etiquetado. Los residuos sólidos y su manejo, provienen de cada actividad funcional o de operación directamente relacionada con la manipulación de los mismos desde su origen hasta el final de su vida útil. Caseres, J. et al. (2018).

Emisiones atmosféricas

A las anteriores problemáticas se suman las emisiones de gases como NO_x, CO, SO₂, CO₂ que provienen de los gases de combustión de las calderas y demás equipos utilizados en la pasteurización, coagulación, enfriamiento, entre otros procesos térmicos de la industria láctea; estas fuentes de emisiones atmosféricas deben ser analizadas y remediadas debido a su contribución en el calentamiento del planeta, considerando obviamente las emisiones que se generan en procesos a gran escala (CEPAL 2010), la identificación de la magnitud y fuentes de emisión de gases de efecto invernadero de un país es una herramienta fundamental para la planeación de su desarrollo económico y ambiental y para el cumplimiento de los compromisos adquiridos si se es miembro de la Convención Marco sobre Cambio Climático.(UNFCCC, 2007).

En esta investigación documental se desea presentar posibles alternativas de generación de biogás para PYMEs del sector lácteo de Cundinamarca, mediante el análisis de algunas de las tecnologías usadas en otros países a partir de procesos de digestión

anaerobia del lactosuero, lo que conllevaría a beneficios sociales, energéticos, tecnológicos y económicos en pequeñas y medianas industrias, a su vez el aprovechamiento de este subproducto, contribuye en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, obteniendo la derivada del uso de un combustible 100% renovable y también una reducción adicional de emisiones difusas (principalmente CH₄), asociadas a una mejor gestión ambiental. (PNIEC 2021-2030, 2019). Todo ello sin descuidar importantes aspectos como la descontaminación, remoción de olores, reducción de agentes patógenos, entre otros beneficios ambientales como la reducción del 85% de DBO y DQO en las aguas residuales, reducción de costos de agua pesos/mes, reducción del volumen de vertimientos m³/kg de producto terminado. (Unidad de asistencia técnica ambiental para las PYMEs). La implementación de un sistema de Biogás, también reduciría costos del servicio público de energía, ya que las industrias pueden autoabastecerse y hasta atender necesidades sociales en zonas rurales.

Según Vega J. P. (2014) ... “en Colombia el 44% de la actividad industrial actualmente se realiza de manera informal, y aproximadamente el 80% de la producción lechera es artesanal” situación claramente expresa en las principales regiones lecheras del país, entre ellas la zona de Cundinamarca. Como trabajo preliminar se realizó una visita a una empresa láctea en el municipio de Zipacón, donde se evidenciaron los impactos negativos mencionados, esta pequeña fábrica produce 1000L/día de leche y la producción del lacto suero mensual equivale a 27.000 Litros, en la actualidad aproximadamente el 60 % de este suero es donado a vecinos y lugareños para ser usado como alimento en la crianza de cerdos, el volumen restante es vertido al alcantarillado.

Generalidades

Estado del arte de la investigación

El químico y físico italiano Alessandro Volta, a finales del siglo XVIII reconoció por primera vez el metano como un gas inflamable contenido en las burbujas que emergían de los pantanos. (FAO 2011. p, 9). Volta se dedicó a recolectar gas del lago Komo para examinarlo, demostrando que la formación del gas depende de un proceso de fermentación que puede ser inflamable. Con el paso de los años, investigadores como Dalton, Henry y Davy (1800), describieron por primera vez la estructura química del metano. Sin embargo, su estructura química final fue aclarada por primera vez por Amedeo Avogadro en 1821. (Landeros, C. & Sánchez, O, 2012).

El primer biodigestor fue construido en 1890 a escala real en la india fomentando la producción de biogás; en 1896 en Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad. (Ávila, C 2016. p, 19).

En 1920 Karl Imhoff puso en práctica el primer tanque digestor en Alemania (Ávila, C, 2016. p, 19). Mundialmente se definieron los denominados tanques Imhoff para el tratamiento de aguas cloacales colectivas, la producción del gas se empleaba para el funcionamiento de las propias plantas, vehículos municipales e incluso algunas redes de gas comunal. (Arce, J. 2011. p, 16).

Durante la segunda guerra mundial se empiezan a difundir los biodigestores a nivel rural en Europa, China e India transformándose en líderes en la materia. India en los años 60, impulso de forma notable las tecnologías para producir biogás a partir de estiércol bovino, con el fin de beneficiarse de la energía y de la obtención de un biofertilizante. (FAO, 2011 p, 9).

El metano alcanzó una especial importancia en dicha época debido a la escasez de combustibles. Al terminar la guerra la accesibilidad de los combustibles fósiles, hicieron que el funcionamiento de la mayoría de las instalaciones cesase. (FAO 2011 p, 9). Después de la segunda guerra mundial se conformaron las primeras fábricas productoras de biogás cuyo producto se empleaba en tractores y automóviles de la época.

La obtención de biogás proviene principalmente de la actividad agropecuaria, residuos animales y vegetales (biomasa). La biomasa se somete a una serie de reacciones bioquímicas para generar el biogás, se constituye principalmente de gas CH_4 y CO_2 .

El lactosuero por su parte ha sido aprovechado principalmente en Europa, la asociación industrial de alimentos y bebidas europeas cuenta con una base de datos específica que provee información relevante, facilitando el acceso a información sobre generación de biogás a partir del suero de leche en el continente. Dentro de los registros se encuentra: Austria cuenta con dos plantas de biogás que emplea lactosuero, Francia cuenta con 11 plantas que funcionan con residuos lácteos y Polonia cuenta con 3 plantas que usan suero con otros sustratos. Además de otros proyectos en Bulgaria, en todos ellos el biogás se destina para generación de energía y combustible para calderas. (Hernández, F. 2015).

Actualmente en Colombia algunas empresas nacionales se dedican a la generación de biogás, promoviendo sus servicios, tal es el caso de la empresa PROMOENERGIA, promotora energías renovables SAS, en Cartagena de Indias. Brinda servicios técnicos para producción biogás y aprovechamiento de biomasa, entre otros. Plantas de biogás - Sistema biodigestor Biobolsa, la tecnología consiste en un biodigestor anaeróbico pre-fabricado, diseñado para el pequeño y mediano productor agropecuario. El Sistema de Biobolsa transforma los desechos del ganado en combustible (biogás) y en bioabono. Se requiere de la producción de estiércol que cumpla con la capacidad de alimentar el biodigestor, el cual debe estar libre de materia inorgánica, contar con agua para hacer la mezcla de estiércol.

Una de las industrias nacionales que implemento el aprovechamiento de biogás fue Manuelita S.A. Dicha empresa en busca de la autogeneración de energía con base en el uso de biocombustibles, implemento un sistema de captura y aprovechamiento de biogás, el sistema se encuentra estructurado por dos lagunas anaerobias que permiten capturar 5.000.000 m³/año y equipos de combustión para generar electricidad a partir del biogás. Las lagunas impermeabilizadas con el fin de proteger el suelo y los acuíferos, elimina emisiones atmosféricas, reduce el uso de combustibles fósiles. (Manuelita, 2014).

Algunos ejemplos industriales de obtención de metano son, el obtenido de estiércoles, ARI diluidas provenientes de mataderos, rendering, industrias papeleras, industria agroalimentaria (cervecías, cítricos, levaduras, almidón). ARD, ARI concentradas provenientes de la agroindustria (vinaza, palma); mezclas de estiércol, forrajes y residuos vegetales.

Por parte del sector azucarero se puede obtener biogás a partir de la vinaza, este es uno de los principales subproductos provenientes de la agroindustria, también se encuentra el bagazo, la cachaza y los residuos de las cosechas. (Otero, O, 2017).

La capacidad de generar biogás en el país a partir de materia orgánica producto de rellenos sanitarios; radica en la generación de desechos a nivel nacional. En Bogotá el relleno sanitario doña Juana se ha dedicado a la generación de biogás con el fin de obtener certificados de reducción de las emisiones del protocolo de Kyoto. Iniciando la generación de energía en una planta de 1,7Mw y de esta manera cumplir su primer objetivo (obtener CER's) generando energía eléctrica a partir de biogás, comprometiéndose con la innovación de tecnología del país; en el proceso se tiene en cuenta que a diario llegan aproximadamente 6.700 Ton de residuos sólidos, dichos residuos se someten a varios procesos hasta llegar a la descomposición anaerobia y posteriormente a la producción de biogás para ser captado y conducido hasta la quema de metano y generación de energía. (Biogás Doña Juana S.A.S E.S.P. S.F)

Objetivos

Objetivo general

Comprender la importancia de la implementación de tecnologías para el aprovechamiento del CH₄ y el CO₂ generados a partir de la biodegradación del lactosuero y su posible aplicación en el sector lácteo del país.

Objetivos específicos

- Identificar las alternativas más eficientes de uso del lactosuero mediante procesos de digestión anaerobia para la generación de biogás.
- Investigar las tecnologías de aprovechamiento del CH₄ y CO₂ contenidos en el biogás con fines de autoabastecimiento energético y de otros procesos que puedan ser aplicables en la industria láctea del país.
- Explorar metodologías emergentes de captura y almacenamiento del CH₄ y CO₂ proveniente del biogás a fin de encontrar otras alternativas más eficientes de aprovechamiento.

Capítulo 1. La industria láctea

1.1. Industria láctea en Colombia

Colombia con aproximadamente 400 mil productores genera un poco más de 7 mil millones anuales de leche menos del 1% mundial (MinAgricultura, 2018). La Cámara de Comercio de Bogotá (2018), indica que la industria láctea en Colombia tiene la participación de casi un cuarto (24.3%) del PIB agropecuario, representando entonces el 1.23% del PIB a nivel nacional. En el 2017 la utilidad de la leche tuvo un incremento del 11% respecto al año anterior, mejorando el sector lácteo en sus procesos productivos gracias a la implementación de nuevas tecnologías en la cadena productiva.

El sector lácteo desde el nivel productor hasta el industrial, enfrenta grandes retos en materia de productividad, es por esto que urge la necesidad de implementar modelos eficientes que permitan aumentar la producción lechera de litros/vaca al día, promover la implementación de fincas tecnificadas, sistemas de pastoreo que maximicen la producción, hacer un adecuado aprovechamiento de los recursos naturales, automatizar los procesos y, en general, estar actualizados con las nuevas tecnologías y tendencias.

1.1.1. Localización

Con base en las cifras recolectada por el MinAgricultura (2018), en la Ilustración No.1, se identifican las principales zonas lecheras en el país y su producción en miles de litros:

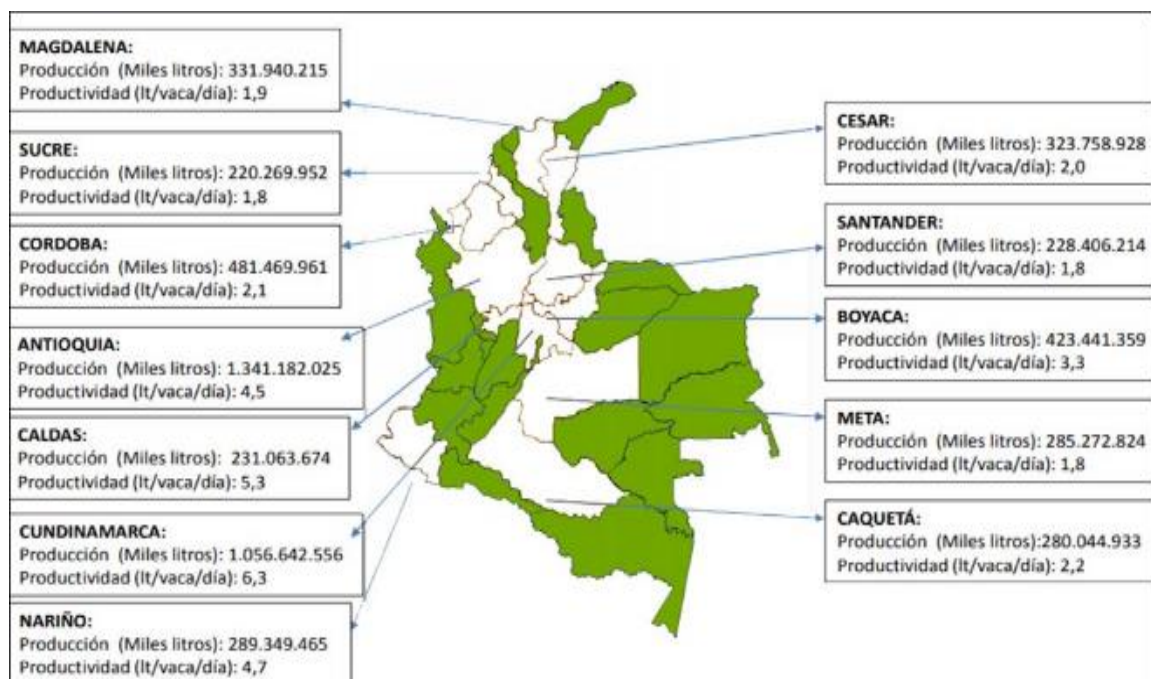


Ilustración 1. Mapa del sector lácteo Colombiano. MinAgricultura- Sector lácteo colombiano (2018) P 6.

Aunque el principal interés de este documento es la problemática relacionada con el medio ambiente, según Cámara de Comercio de Bogotá (2018), en su boletín denominado Clúster Lácteo, en términos generales, los retos que tiene el sector lechero en Colombia se concentran en tres líneas. Por una parte, la informalidad presente en el mercado que afecta los precios, generando una desigualdad en la competencia. Por otro lado, están los desafíos relacionados con los tratados de libre comercio, los cuales podrían impactar los precios debido a que la industria no está preparada a nivel tecnológico para desarrollar altos niveles de productividad y así poder competir. Finalmente, y como consecuencia del segundo punto, es necesario que la industria lechera colombiana le apueste a la tecnología y mejore así su productividad.

1.2 Marco regulatorio en el país

Referente a la normatividad concerniente al uso de nuevas energías e incentivos, citamos las siguientes:

Ley 697 de 2001

La ley fomenta el uso eficiente y racional de la energía, a su vez promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.

Decreto 3683 de 2003

El decreto fomenta el uso racional y eficiente de la energía, de tal manera que se tenga la mayor eficiencia energética para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, generando la competitividad en el mercado energético colombiano, la protección al consumidor y la promoción de fuentes no convencionales de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables. (Secretaría jurídica distrital de la alcaldía mayor, 2003).

Decreto 2469 de 2014

Establece el lineamiento político energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración. La CREG regula la actividad de autogeneración a gran escala en el SIN en la regulación 024 de 2015.

Ley 1715 de 2014

La ley tiene como objetivo promover el desarrollo y uso de las fuentes no convencionales de energía renovable, en el sistema energético nacional, mediante la integración al mercado eléctrico, participación en zonas no interconectadas y otros usos que permitan el desarrollo económico sostenible, que a su vez permitan la reducción de emisiones de GEI. La ley también incluye el aprovechamiento de la biomasa agrícola, energía de residuos y de cultivos forestales energéticos.

Resolución UPME 281 del 2015

Define el límite máximo de autogeneración a pequeña escala.

Decreto 1623 de 2015

Establece la expansión de cobertura del servicio de energía eléctrica en el sistema interconectado nacional y en las ZNI.

Resolución UPME 045 de 2016

Procedimientos que permiten la certificación a proyectos FNCER para acceder a incentivos tributarios de la Ley 1715.

Resolución CREG 030-2018

Tiene como objeto regular los aspectos operativos y comerciales para permitir la integración de la autogeneración a pequeña escala (AGPE) y de la generación distribuida al Sistema Interconectado Nacional (SIN) para auto generadores a pequeña escala, gran escala (mayores a 1 MW y menores o iguales 5 MW), generadores distribuidos (GD) y a los comercializadores que los atienden, a los operadores de red y transmisores nacionales.

1.3 Proceso de obtención del lactosuero

El lactosuero es una sustancia líquida que se obtiene por la separación del coágulo de leche en la elaboración de queso. Es un líquido translúcido verde obtenido de la leche después de la precipitación de la caseína. (Jelen, 2003). Su alto contenido en lactosa, nutrientes, minerales, vitaminas, grasas y proteínas, lo constituye como una buena fuente económica.

La composición y tipo de lactosuero depende de la eliminación de la caseína, y varía de acuerdo al tipo de leche que se emplee en el proceso de fabricación del queso, condición que también obedece al proceso de tecnología usado. (Jelen, 2003).

Existen varios tipos de lactosuero dependiendo principalmente de la eliminación de la caseína, el primero denominado dulce, está basado en la coagulación por la renina a pH 6,5. El segundo llamado ácido resulta del proceso de fermentación o adición de ácidos orgánicos o ácidos minerales para coagular la caseína como en la elaboración de quesos frescos. (Jelen, 2003).

Según Ramírez J. (2018), en cualquiera de los dos tipos de lactosuero obtenidos, se estima que por cada kilogramo de queso se producen 9kg de lactosuero, lo cual equivale del 85 al 90% del volumen de leche.

Tabla 2. Composición de lactosuero dulce y ácido. (Panesar Et, Al. 2007)

Componente	Lactosuero dulce (g/L)	Lactosuero ácido (g/L)
Solidos totales	63,0-70,0	63,0-70,0
Lactosa	46,0-52,0	44,0-46,0
Proteína	6,0-10,0	6,0-8,0
Calcio	0,4-0,6	1,2-1,6
Fosforo	1,0-3,0	2,0-4,5
Lactato	2,0	6,4
Cloruros	2,2	1,1

La composición del lactosuero y su higiene sanitaria son parámetros fundamentales que se deben tener en cuenta para utilizar en la fabricación de productos lácteos y de los ingredientes necesarios. La leche que se utiliza en los procesos debe ser de alta calidad, así como el manejo que se le da y la higiene en la fabricación del queso determina las características del lactosuero, los parámetros a considerar debido a que varía en la composición del suero son:

- Estacionalidad de la leche.
- Fases para elaborar el queso (incluyendo los tratamientos térmicos de la leche, el uso de cloruro de calcio, los cultivos bacterianos utilizados (mesófilo o termófilo) el tipo de coagulación y coagulante utilizado. Panesar Et, Al. (2007).

1.3.1 Procesos lácteos

Leche

La leche es un producto de origen animal, rica en nutrientes, proteínas y grasas, aunque sus agregados dependen de diversos aspectos que sobreponen los procesos de producción cría, alimentación y clima. La leche es sometida a diversos procedimientos con el fin de determinar su calidad se realizan pruebas organolépticas, determinación de acidez

(con el fin de establecer carga microbiana, pues una leche con acidez alta total es interpretada como un producto de mala calidad).

De la leche se pueden obtener una variedad de productos lácteos a continuación se describe el proceso de elaboración de algunos de ellos de los cuales se puede obtener lactosuero:

Elaboración de crema

La parte rica en grasa de la leche es considerada crema y constituye uno de los productos lácteos de mayor consumo y producción masiva, su proceso consiste en descremar naturalmente o por descremación la leche entera. Las siguientes son sus etapas: recepción y filtrado, descremado, empacado y almacenado. Este subproducto lácteo no supone ser fuente del lactosuero. (FAO. Proceso para la elaboración de productos lácteos, 2011).

Elaboración de mantequilla

La elaboración de la mantequilla lavada se da gracias a la crema o nata de la leche, y comienza con la mezcla (emulsión de agua en grasa), el proceso de elaboración inicia con el batido de la crema con el fin de unir glóbulos grasos para formar la mantequilla, posteriormente sigue el lavado, donde la mantequilla se empieza a formar y se añade agua para que se comience a compactar. Posteriormente sigue el desuerado, donde la grasa se separa de la fase no grasa que constituye el suero. Y las tres etapas finales consisten en el salado, amasado y empacado del producto final. (Zamoran, D. 2012).

Elaboración de queso

El queso permite conservar los principales elementos nutricionales (proteína, minerales, grasa, calcio, fosforo y vitaminas) de la leche. El queso tiene diferentes variantes

de fabricación, pero sus etapas de elaboración son las mismas ya que se cumplen para todo tipo de quesos. Las etapas de producción de queso inician con la recepción de la leche cruda, seguido del filtrado de partículas extrañas, descremado y coagulación del cuajo, posteriormente se realiza el desuerado, salado, prensado, empacado y almacenado. (Zamoran, D, 2012).

En la elaboración del queso fresco es donde más se obtiene suero en la etapa de desuerado y se deja escurrir el suero aproximadamente por 10 minutos. El queso fresco y el queso crema producen suero y su proceso de elaboración es igual pero el queso crema no es descremado y en ambos procesos se puede obtener suero dulce o suero salado en las etapas de desuerado y prensado respectivamente.

Otros quesos de los cuales también se pueden obtener lacto suero son el queso relleno, queso ahumado y queso mediansangre, este último tiene la particularidad de obtención de suero al 50% en dos etapas, el primero antes del salado y el segundo después del salado.

Elaboración de quesillo

El proceso de elaboración de quesillo cuenta con varias etapas diferentes a las de otros tipos de quesos, primero se realiza la recepción de leche cruda y el filtrado, seguidamente se agrega suero ácido o leche ácida como fermento (1 gal de leche ácida por cada 57 galones de leche o ½ litro de suero ácido por cada 10L de leche). Posteriormente se coagula y se realiza el desuerado y salado, el quesillo se somete a un tratamiento térmico con el fin de adquirir una adecuada textura. Finalmente se moldea y enfría. (Zamoran, D, 2012).

Elaboración de cuajada

Las etapas de elaboración de la cuajada se dividen en las siguientes etapas: recepción de leche cruda, filtrada y descremada, estandarización de la leche entera, coagulación, desuerado (obtención de suero dulce). Salado, molido amasado, empacado y almacenado. (Zamoran, D 2012).

1.3.2 Usos del lactosuero

Quesos de suero

Los quesos de suero son aquellos productos en estado sólido, también se pueden encontrar semisólidos o blandos. Dichos quesos se pueden obtener mediante procesos de coagulación de proteínas del suero, se somete a procesos de calentamiento en donde se agrega ácido, el suero concentrado es moldeado. Durante este proceso se puede adicionar leche, crema u otros productos de origen lácteo, antes o después de la coagulación. Ejemplo: Ricota, tipo Brocciu, Brown cheeses (quesos marrones). (Juliano, P et al., 2017).

Bebidas a base de suero

La producción de bebidas a base de suero se enfoca en productos bebibles, que se elaboran de forma tradicional a partir del suero como ingrediente principal. En Colombia, el suero ácido se emplea para elaborar bebidas no fermentadas, por su parte el lactosuero dulce se emplea para elaborar las bebidas fermentadas. También se utiliza lactosuero concentrado. (Juliano, P et al., 2017).

- Las bebidas no fermentadas que se disponen en el mercado actual, y se componen de suero líquido principalmente, pulpa de fruta o jugo, dichas bebidas son muy similares a los jugos de fruta, pero contiene altas concentraciones de proteína, vitaminas y minerales generando una imagen positiva a los consumidores por el valor nutricional de los mismos. (Juliano, P et al, 2017).

- Las bebidas fermentadas se elaboran de forma similar a las bebidas no fermentadas, la diferencia radica en la fermentación, en donde la lactosa es transformada en ácido láctico mediante cultivos específicos. A estas bebidas se le adicionan ingredientes en polvo, además de hasta un 50% en leche para aumentar la viscosidad y organolépticas del producto final. (Juliano, P et al., 2017).

Suero concentrado líquido

Las PYMEs se encargan de la elaboración de este tipo de suero, ya que al no contar con la maquinaria necesaria para realizar el secado, sus compradores son empresas grandes que cuentan con una capacidad ociosa de secado durante el año. (Juliano, P et al, 2017).

Suero para la alimentación animal

El suero de quesería que se utiliza para alimentar animales, es una gran alternativa de valoración para el pequeño productor quesero que se dedica a criar terneros y cerdos. Desarrollar productos con suero de quesería cobra importancia por sus múltiples beneficios como prebiótico, inmunomodulador, estimulador de la micro biota benéfica y mejora el bienestar animal. El uso del suero en animales puede hacerse como: agua de bebida, aditivo o ingrediente de ensilajes, como ingrediente en la elaboración de dietas o sustituto lácteo para la crianza animal. (Juliano, P et al, 2017).

Suero para generación de Biogás

La utilización del lactosuero y su utilización como bioenergía aprovechando algunos de sus compuestos como son el CH₄, CO₂, desechando el H₂S y otros elementos que se dan en menor proporción, será descrita a lo largo del documento.

1.4 Proceso productivo del queso

Fases de elaboración del queso fresco

La leche cruda es transportada en cisternas de acero inoxidable y en bidones plásticos, al llegar para ser procesada se procede al lavado de tanques, posteriormente se toman muestras de la misma para realizar un análisis, verificando de esta manera que se cumplan con los parámetros establecidos, los cuales son: T: 28°C, organolépticos: olor, color, sabor. (FAO s.f). El proceso productivo del queso se explica a continuación y se muestra en la ilustración 2.

Higienización, medición y enfriamiento

La leche pasa por un filtro de tela fina, allí es medida por volumen y finalmente se bombea hacia el sistema de enfriamiento de placas para bajar la temperatura a 4°C. (Procedimiento que no es fundamental y no se cumple en todas las queseras),

Almacenamiento de leche

La leche cruda es almacenada en tanques denominados silos de leche cruda.

Proceso de estandarización

Donde la leche cruda es bombeada hacia una descremadora para estandarizar el contenido de materia grasa, de esta manera se logra separar el exceso de grasa del parámetro de crema. Márquez, et al (2009).

Pasteurización

La leche es impulsada hacia un intercambiador de calor de placas mediante bombeo, allí se lleva a cabo el proceso de pasteurización a 76°C durante 15 segundos en el intercambiador de calor, seguido de esto se procede al enfriamiento del sistema de pasteurización hasta 33°C. Márquez, et al (2009).

La inoculación

Es el proceso mediante el cual la leche calentada hasta 33°C se le agregan los aditivos del cuajo líquido y cultivos lácticos mesofilos, permitiendo la pre maduración del queso, esto permite que el queso obtenga el sabor, color, aroma y acidez característico, finalmente en el proceso de inoculación se agita para lograr una mezcla homogénea de los aditivos. Márquez, et al (2009).

Coagulación

La mezcla inoculada coagula totalmente a 33°C durante un tiempo aproximado de 30 a 40 minutos y el tiempo de floculación es de 15 a 30 minutos. Al finalizar el proceso de coagulación, se detiene el calentamiento y se realiza un corte de la leche cuajada para seguir el desuerado, allí se debe dar 30 minutos de agitación rápida, 10 minutos de agitación lenta y finalmente se realiza el desuerado del producto a 33°C durante 45 minutos, drenando el suero contenido. Márquez, et al (2009).

Seguidamente se lleva un bloque a la maquina picadora para triturar y agregar sal con una dosificación de 0.18 Lb de sal por cada 4L de leche procesada. Posteriormente se realiza el proceso de moldeo en donde se colocan moldes de acero inoxidable y se prensa a 100PSI en una prensa hidráulica por 48h. Finalmente el queso es empacado, almacenado a una temperatura de 4°C a 8°C y expedido. La elaboración de queso guarda una estrecha

similitud entre los diferentes tipos de quesos. El queso fresco es elaborado de la siguiente manera. Márquez, et al (2009).

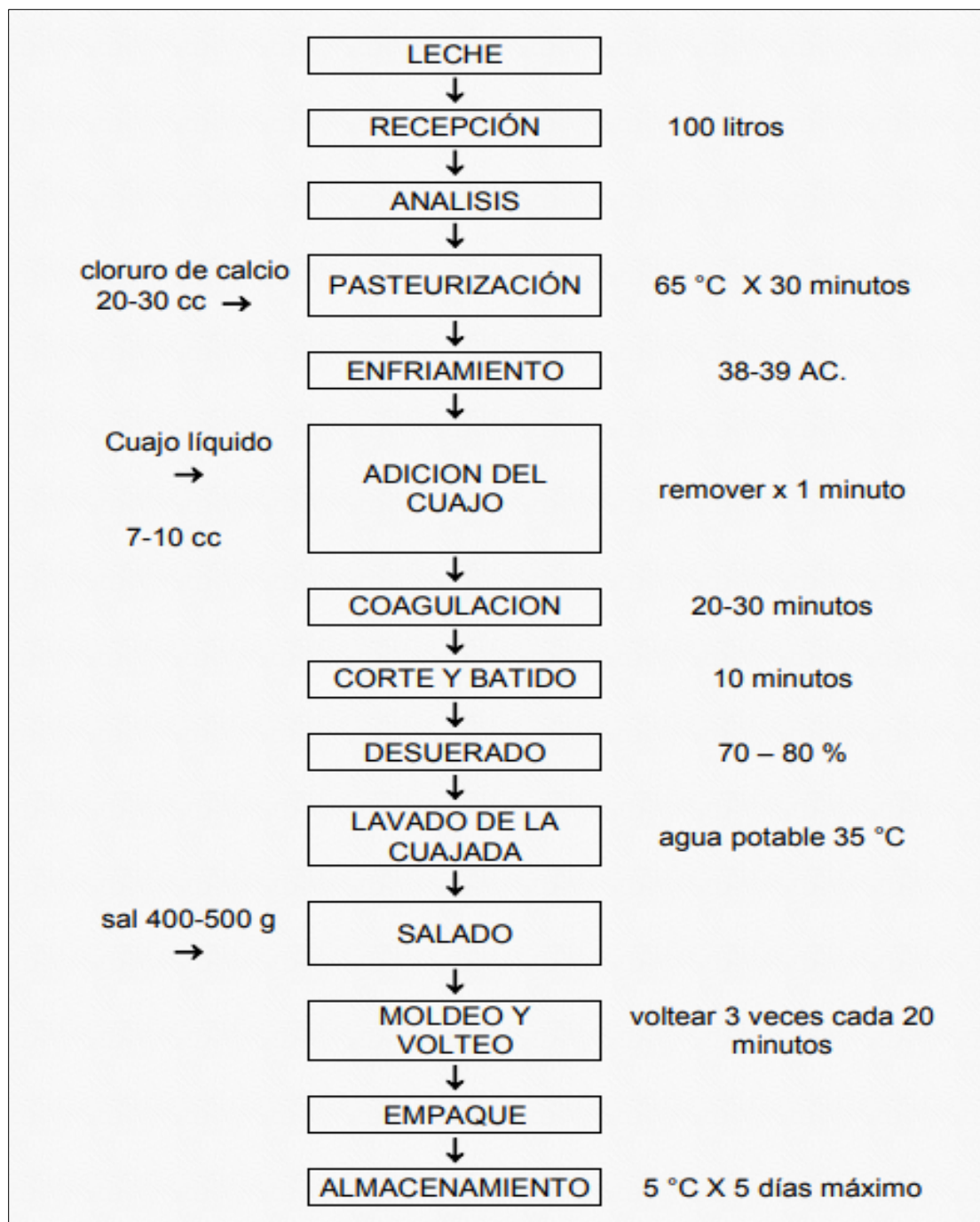


Ilustración 2. Elaboración de queso fresco. Procesados Lácteos. FAO s.f

Capítulo 2. Proceso de digestión del suero

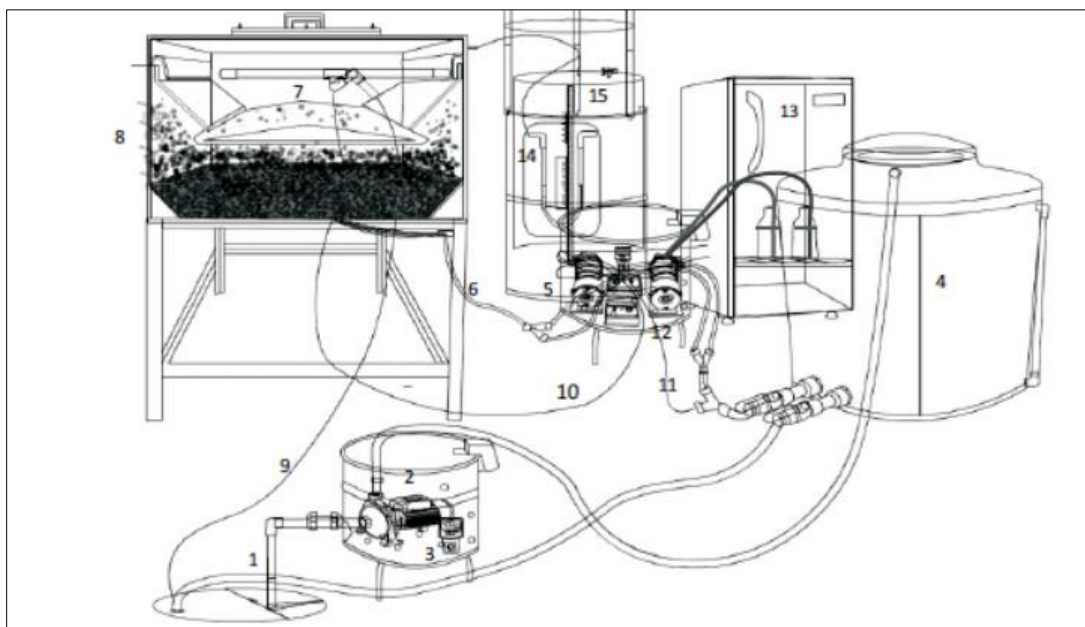


Ilustración 3. Modelo de un biodigestor. Pérez, Jhonny, & Aldana, Gerardo. (2013). 1. Captación. 2. bomba periférica. 3. Programado horario. 4. Tanque almacenamiento. 5. Bomba alimentación. 6. Afluente. 7. Reactor. 8. Puntos de muestreo. 9. Efluente. 10. Muestra efluente. 11. Muestra afluyente. 12. Bomba para muestreo. 13. Refrigeración. 14. Manómetro. 15 medidor de biogás.

2.1. Digestión anaerobia del lactosuero:

La digestión anaerobia degrada y estabiliza materia orgánica en circunstancias específicas, la ausencia de oxígeno por organismos microbianos, el proceso consiste en que las poblaciones de microorganismos simbióticos cuentan con la habilidad de utilizar un diverso espectro de sustratos en ausencia de oxígeno para sintetizar productos finales. La digestión de materia orgánica se realiza en un rango diferente de temperaturas inclusive en condiciones termofílicas, mesofílicas y psicofílicas. Las ventajas del proceso son la baja generación de lodos, bajo consumo de energía y alta producción de CH_4 . (Parra, R, 2010).

Las cuatro etapas bioquímicas de la digestión anaeróbica del lactosuero son la hidrólisis, acidogénesis, acetogenesis y metanogénesis; como se muestra en la ilustración 4. primero se empieza con la hidrólisis de lípidos, carbohidratos (destacando la lactosa, biopolímero de mayor contenido en lactosuero) y proteínas. La acidogénesis da lugar a la fermentación de monosacáridos y se obtiene CO_2 y H_2 . Además, se obtiene lactato, propionato, acetato, butirato y etanol.

Las etapas de hidrólisis y acidogénesis se realizan de manera casi simultánea. Posteriormente en la acetogenesis, se divide en dos vías, en la primera las bacterias acetogenicas que producen H_2 oxidan ácidos grasos y los alcoholes a acetato, produciendo CO_2 y H_2 . En la segunda vía las bacterias homoacetogenicas producen CO_2 y H_2 compitiendo con microorganismos metanogénicos por el consumo de este gas. Finalmente, en la metanogénesis, las arqueas metanogénicas permiten obtener el proceso final de CH_4 . Los microorganismos son estrictamente anaeróbicos y en su mayoría mesófilos. Son de dos tipos: hidrogenófilos, los cuales reducen el CO_2 y el formato a CH_4 y acetoclásticos que hidrolizan el acetato producido en la acetogénesis, oxidando el grupo carbonilo a CO_2 y el grupo metilo a CH_4 . Aproximadamente el 70% del metano es producido a partir del acetato y el 30% a partir del CO_2 . (FAO et al., 2011).

Según la red mexicana de bioenergía (2012); las cuatro etapas de la digestión anaeróbica comienzan con la hidrolisis donde las moléculas o grandes polímeros son reducidos de tamaño, pasan de ser moléculas solubles e insolubles como carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos, estos no se metabolizan de forma directa por los organismos anaeróbicos, pasan a ser monómeros o moléculas más pequeñas y simples. La hidrólisis de polímeros orgánicos se lleva a cabo por enzimas extracelulares. Posteriormente en los procesos de acidogénesis y a cetogénesis, los monómeros liberados en la hidrolisis, en esta etapa se degradan mediante fermentación, en donde los compuestos orgánicos funcionan como aceptores y donadores de electrones. Los productos principales de esta etapa son ácidos grasos volátiles.

El ácido acético es el mayor intermediario en la cadena alimenticia anaerobia. El dióxido de carbono y el metano, así como los carbohidratos, alcoholes, ácidos carboxílicos, aldehídos, compuestos aromáticos. Cuando las hexosas (azúcares de seis carbonos) son convertidas exclusivamente a acetato, la reacción fermentativa es llamada homoacetogénesis. (Reyes, E. A., 2017).

Finalmente, en la metanogénesis se forma el metano, producto de la digestión anaerobia se limita por el dióxido de carbono, compuestos que contengan un grupo metilo y acetato. Todos los metanógenos son arqueas (dominio arquea) aunque las arqueas son organismos antiguos descubrieron su existencia en el siglo XIX gracias a la formación de metano debido a la actividad microbiológica. Según Reyes, E. A. (2017), en este último proceso de descomposición los microorganismos metanogénicos son los responsables de la formación de metano a partir de sustratos mono carbonados o con dos átomos de carbono unidos a un enlace covalente. (Gonzales, R. 2008)

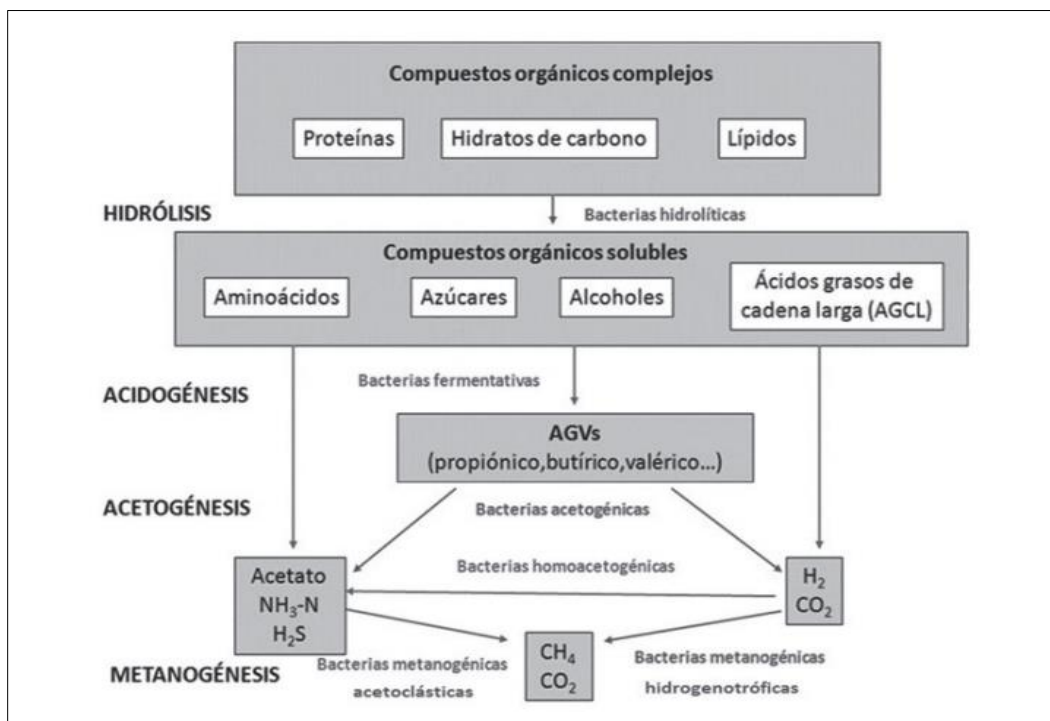


Ilustración 4. Proceso de digestión anaerobia. Fernández, Rodríguez.et. al. (2016)

2.2 Nutrientes necesarios para la digestión anaerobia

Para garantizar un crecimiento significativo de microorganismos se debe tener en cuenta como parámetro fundamental la presencia de nutrientes en el medio, en la mayoría de los casos el sustrato es el encargado de suministrar dichos nutrientes pero, resulta de mayor relevancia la relación entre las masas de carbono y nitrógeno en el sustrato. De esta manera se puede estimar cual es el desempeño del digester y tener en cuenta si este se redujo después de un periodo de tiempo determinado, para establecer la causa más probable. El rendimiento y producción de biogás depende del sustrato, condiciones ambientales del biodigestor, parámetros de pH y temperatura.

Dichos parámetros condicionan el proceso anaerobio:

pH

El pH permite determinar la toxicidad o la inhibición de las bacterias metanogénicas (toxicidad con un pH inferior a 6.0) el adecuado funcionamiento de un biodigestor presenta un pH de 6.5-7.5.

Temperatura

La temperatura es un parámetro ambiental que se debe tener en cuenta debido a su importancia, inhibe o mejora grupos microbianos, a causa de que las actividades requieren reacciones enzimáticas, dichas enzimas son complejos moleculares sensibles a la temperatura cuando el biodigestor funciona para cada ambiente, es aconsejable que los rangos de temperatura sean: 0 – 20 °C, para el ambiente psicrófilico; 20 – 45 °C, para el ambiente mesófilico; y 45 – 97 °C, para el ambiente termófilico.(Arboleda, Y, 2009).

Tiempo de retención

Este se define como el lapso de tiempo que se mantiene la materia orgánica dentro del sistema para alcanzar la degradación. La retención se relaciona directamente con la temperatura ambiente y en condiciones óptimas del proceso, con una temperatura de 30 °C, el tiempo de retención. (Arboleda, Y, 2009). Este parámetro puede variar dependiendo el tipo de reactor y el volumen.

2.3 Beneficios de la digestión anaerobia

El biogás tiene una gran variedad de utilidades, al provenir de la biomasa es constituido como una fuente de energía renovable. En la digestión anaerobia se adquieren productos de alto poder energético como alcoholes, ácidos orgánicos y metano; los cuales sirven como nutrientes de otros organismos, además la generación de biogás es aprovechada como fuentes de energía para la sociedad. (FAO et al., 2011).

Por otro lado, los biodigestores brindan una significativa reducción de la presión de los rellenos sanitarios. Reduciendo los residuos orgánicos, los precios que generan la disposición de los mismos y minimizan la contaminación al recurso hídrico reduciendo la lixiviación de nitratos. (FAO et al., 2011).

2.4 Biodigestores más usados en la industria láctea, procesos y variables para la generación de biogás

2.4.1 Biogás

El biogás es el producto de interés, resultado de la descomposición anaeróbica de materia orgánica, compuesto principalmente por CO₂ y CH₄ es el producto final de una serie de reacciones en distintas etapas de degradación como se explicó anteriormente en el proceso de digestión del suero. Durante la producción de biogás se deben controlar parámetros relevantes como temperatura, pH y concentraciones de sustratos para su optimización.

Tabla 3. Características generales del biogás (FAO et al., 2011)

Composición	55-70% metano (CH ₄) 30-45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0-6.5 kW h m ³
Equivalencia de combustible	0.60-0.65L petróleo/m ³ biogás
límite de explosión	6-12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650-750°C con el contenido de CH ₄ mencionado
Presión crítica	74-88atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2kg m ⁻³
Olor	Azufre (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

2.4.1 Biogás a partir del suero de la leche

El suero de leche, de acuerdo a lo expresado por Valencia, Ramírez (2009), al representar cerca del 90% del volumen de la leche, contiene elementos en su mayoría de carácter hidrosolubles, ya que de ésta, el 95% de lactosa (azúcar de la leche), el 25% de las proteínas y el 8% constituye grasa de la leche.

Su estructura cambia de acuerdo al origen de la leche y al tipo de queso fabricado, pero de forma general contiene aproximadamente el 93.1% de agua, 4.9% de lactosa, 0.9% de proteína cruda, 0.6% de cenizas (minerales), 0.3% de grasa, 0.2% de ácido láctico y vitaminas hidrosolubles. Valencia, (2009).

Aproximadamente el 70% de proteína cruda que se encuentra presente en el suero corresponde a proteínas con un importe mayor de nutrientes al de la caseína, como son beta-lacto globulina, alfa-lacto globulina, inmunoglobulinas, proteosa-peptonas y enzimas nativas. Dependiendo de la acidez, el suero se clasifica en dulce (pH mayor de 8), medio ácido (pH 5-5.8) y ácido (pH menor a 5). Valencia, (2009).

Como indica Fernández et al. (2016), no obstante, la efectividad de las diversas alternativas tecnológicas que permiten el aprovechamiento de los compuestos de interés, una gran parte de producto sigue siendo inutilizable.

2.5 Digestores

Los biodigestores son equipos que se diseñan y construyen para generar un sistema capaz de producir biogás aprovechando los residuos agroindustriales y otros, permitiendo la producción de energía limpia con poco presupuesto mediante una fuente de energía renovable. Aplicar esta tecnología no es algo nuevo, aunque en los últimos años ha recobrado gran importancia debido a la necesidad de energía y la demanda de combustibles fósiles tradicionalmente utilizados. Por otra parte el aprovechamiento del biogás promueve el descenso en las emisiones de GEI como el CH₄, cuyo potencial de calentamiento global es 23 veces superior al del CO₂.(Rivas Solano, Faith Vargas, & Guillén Watson, 2011, p.40).

2.5.1 Componentes de un digestor anaeróbico

Dentro de los elementos que componen principalmente un digestor anaeróbico se encuentra el reactor que contiene la materia prima necesaria para la digestión; un receptáculo para almacenar el gas, y los sistemas de salida de biogás, entrada o carga de la materia orgánica prima y la descarga de materia orgánica estabilizada.(FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF, 2011, p.78)

2.5.2 Configuraciones de un biodigestor anaeróbico

Aunque existen diversos tipos de biodigestores y configuraciones de los mismos, factores determinantes en el proceso metanogénico, como la naturaleza y composición bioquímica de materias primas es primordial para profundizar en los sistemas de biogás, ya que la materia prima fundamental que es el lactosuero por presentar una dilución mayor y en consecuencia una DQO menor, se debe tratar con biodigestores de una eficiencia alta de filtro anaerobio.

En cuanto al lactosuero, se han desarrollado un sin número de investigaciones en los que se han registrado diferentes configuraciones y escenarios para su puesta en marcha con el fin de que se optimicen los procesos, debido a estos trabajos se han identificado algunos factores que restringen su aplicación como son: la tendencia a la acidificación o la limitación de nutrientes. Gracias a lo anterior, se ha optado por manejar mezclas de lactosuero con otros sustratos en lo que se denomina sistemas de co-digestión anaerobia. Esta iniciativa ha permitido alcanzar resultados favorables, primordialmente cuando se maneja en combinación con desechos ganaderos. (Fernández Rodríguez, Martínez Torres, Morán Palao, & Gómez Barrios, 2016, p. 58).

En los últimos años se ha registrado publicaciones de varios trabajos que detallan las principales iniciativas para el aprovechamiento y tratamiento del suero lácteo, contemplando también la valorización energética del mismo. Los Biodigestores empleados con mayor frecuencia son los de flujo ascendente con lecho/manto de lodos, conocidos por las siglas UASB, (siglas en inglés de upflow anaerobic sludge blanket). Es frecuente también el uso de los filtros anaerobios, principalmente de flujo ascendente (UAF), (siglas en inglés upflow anaerobic filter). (Fernández Rodríguez et al., 2016, p 52).

2.6 Tecnologías de los biodigestores

Como ya se ha mencionado, existen variados tipos de biodigestores, así como las distribuciones de su estructura, esto se realiza con la finalidad de buscar que exista la mejor conformación y producción de Biogás, con base a las condiciones de la biomasa a utilizar.

Los conocimientos empleados para el óptimo aprovechamiento de la biomasa están en manos de la ingeniería de bioprocesos, estableciendo condiciones propicias para el desarrollo de los microorganismos, el crecimiento es proporcional a la obtención del biocombustible. Es por ello, que en la producción de biogás es primordial controlar parámetros relevantes como temperatura, pH y concentración de sustratos, entre otros, para la optimización del mismo. (Bernd Weber, Marcelo Rojas Oropeza, Miguel Torres Bernal, 2012, p. 4).

A continuación, se presentarán tres tecnologías, de las más utilizadas en el sector lácteo para generación de Biogás.

2.6.1. Biodigestor tipo UASB

Digestor de Manto de lodos de Flujo Ascendente (UASB) siglas de Upflow Anaerobic Sludge Blanket, los reactores UASB también son conocidos en español como RAFA (Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente). **Ilustración 5.** Reactor anaerobio UASB

Los reactores UASB son de carácter cilíndrico y se ubican en posición vertical. El efluente a ser tratado se integra al reactor por la parte inferior, cruza ascendentemente el contenedor y sale por la parte superior. La particularidad de este reactor es que se promueve la agrupación de bacterias en forma de gránulos, lo que mejora el trabajo entre microorganismos logrando eficiencia de la degradación de la materia orgánica. La conformación de los gránulos se consigue con un inoculo granular cuando se va a iniciar la operación del biodigestor. El efluente asciende lentamente a través de la columna generando un flujo vertical. Los gránulos establecen un manto de barro hacia la parte media del reactor el cual flota.

En el proceso de contacto de estos con el efluente se origina el tratamiento y la eliminación por acción de las bacterias anaeróbicas, formando burbujas de biogás que al ascender remueven el líquido ayudando a su vez el contacto entre las bacterias y el efluente. El gas formado se posiciona en la parte superior del reactor. El líquido que cruza el manto y sale del reactor posee sólidos residuales y gránulos que se decantan en un sedimentador. Los sistemas UASB son apropiados para efluentes con altas cargas orgánicas y con pocos sólidos como en el caso de la industria alimenticia láctea, entre otras. Los reactores UASB realizan el tratamiento de volúmenes relativamente altos en tiempos cortos. Con base en el volumen del efluente a tratar se calcula el tamaño y capacidad del reactor, sus dimensiones pueden variar de unos pocos metros cúbicos hasta 200 m³. (Hernández F, 2015, p. 13, 14,15).

El reactor UASB es uno de los equipos más ampliamente usados en procesos para recuperar las aguas residuales, con más de 500 instalaciones alternando amplios rangos de aguas residuales industriales gracias a su bajo costo operativo, la demanda de espacio, genera una baja producción de lodos y permite resultados interesantes en relación a la eliminación de carga orgánica. Este reactor fue de los primero en ser usado para mejorar el tratamiento anaerobio de aguas residuales agroindustriales con concentraciones media-alta de materiales orgánicos. Este tipo de reactor (UASB) es una de las tecnologías más utilizadas por diversas industrias, como es el caso del sector papelerero, textiles, industria petroquímica, industria cárnica e incluso la alimentaria. (Rajinikanth et al., 2008). La tecnología UASB para el tratamiento de residuos se ha extendido y se encuentra en crecimiento en países latinos, contando con la experiencia de países como Argentina, Brasil, Colombia, Guatemala y México, donde el 45% de todos los reactores anaerobios tratan residuos de forma continua. (Parra R, 2010, p. 5387). Con base en lo expuesto por Hernández F, en su libro denominado Producción de Biogás con suero de Queso: Tratamiento y generación de energía “este tipo de Biodigestor ha sido mayormente seleccionado, permitiendo los excelentes resultados en la industria láctea, citando casos de industrias de países como Canadá, Dinamarca, Francia y Bulgaria” (2015, p 31).

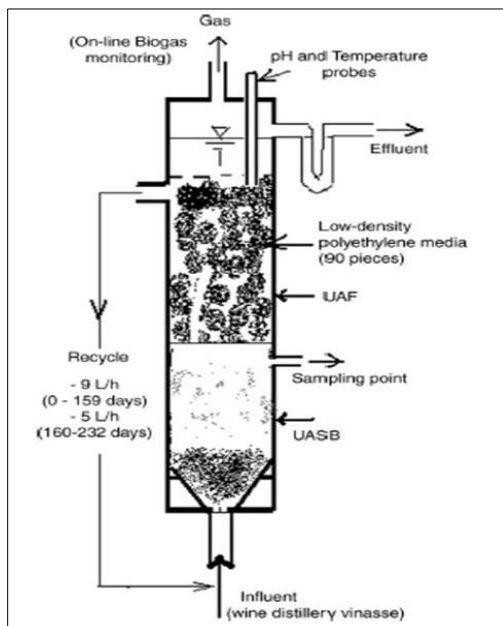


Ilustración 6. Reactor anaerobio UASB Rajinikanth et al. (2008).

2.6.2 Biodigestor tipo CSTR

El reactor continuo de tanque agitado (CSTR), siglas en inglés de continuously stirred tank reactor, es un método de mezcla continua o completa; está compuesto por un consiste en un espacio cilíndrico vertical con agitadores que mezclan el efluente constantemente. Esta tecnología es apropiada para el tratamiento de efluentes con alto contenidos de sólidos no disueltos y pueden llegar a niveles muy elevados, de hasta 6000 m³. (Hernández F, 2015, p. 16).

Según la investigación de Fernández Rodríguez C, et al., :

El reactor continuo de tanque agitado (CSTR) de igual forma se ha empleado para el tratamiento de lactosuero diluido y soluciones sintéticas del mismo. Sin embargo, a causa del lento crecimiento de los microorganismos metanogénicos, este tipo de biodigestores muestra rendimientos de transformación de materia orgánica decrecientes, 58-18%, al limitar el tiempo de retención hidráulica (TRH).

No obstante, si se modifica la temperatura y operando en régimen termofílico se puede alcanzar un aumento significativo en la transformación de materia tal y como lo demuestran los resultados obtenidos por Yang, Yu & Hwang quienes lograron conversiones de demanda química de oxígeno (DQO) comprendidas entre 94,6-96,4%.(2016, p. 52).

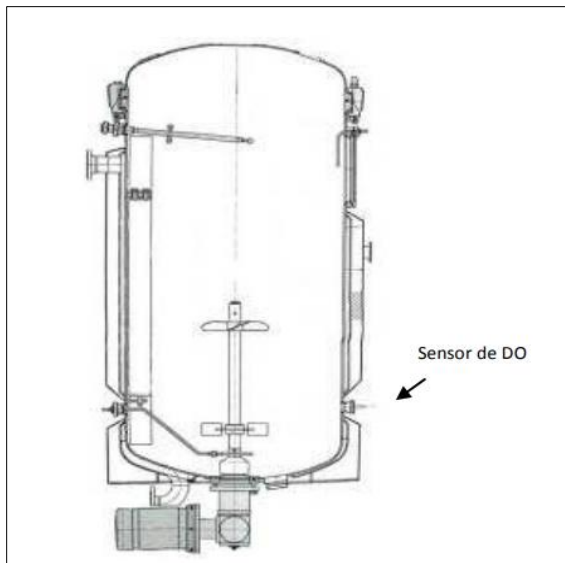


Ilustración 7. Reactor industrial tipo tanque agitado- CSTR. Raffo-Durán, J., y Figueredo-Cardero, A., y Dustet-Mendoza, JC (2014).

2.6.3. Biodigestor tipo UAF

Los denominados filtros anaerobios de flujo ascendente (UAF), siglas en inglés “upflow anaerobic filter.

Por su parte este tipo de reactor corresponde a una clase tipo tubular que trabaja en régimen continuo y en flujo ascendente, en este tipo de biodigestor, la alimentación también ingresa por la parte inferior, atravesando todo el perfil longitudinal por medio de un lecho de piedras, para posteriormente salir por la parte superior. Inicialmente, las piedras se utilizaban como relleno en filtros anaeróbicos, pero por el bajo volumen de poros (40 – 50%), provocaban inconvenientes de obstrucción. Actualmente, el medio empleado con más regularidad es el plástico sintético o cerámicas con diferentes configuraciones. El volumen poroso del plástico está en el rango de 80 y 95% y crea una elevada área superficial específica, típicamente de 100 m²/m³ o mayor, que beneficia el incremento de la biopelícula. .(FAO et al., 2011, p.87).

Unos de los inconvenientes que manifiestan este tipo de biodigestores y que por ende restringen su eficiencia son a casusa de un incremento de acumulación de biomasa que ocasiona la inundación o la aparición de zonas muertas. El UAF presenta el problema que la mayor parte de la biomasa fermentativa se deposita en la parte inferior ya que esta es el área en la que se da el primer contacto con la alimentación. Con la finalidad de evitar esta predisposición, es preferible la utilización de filtros con múltiples entradas para la distribución de la alimentación .(Fernández Rodríguez et al., 2016,p. 52)

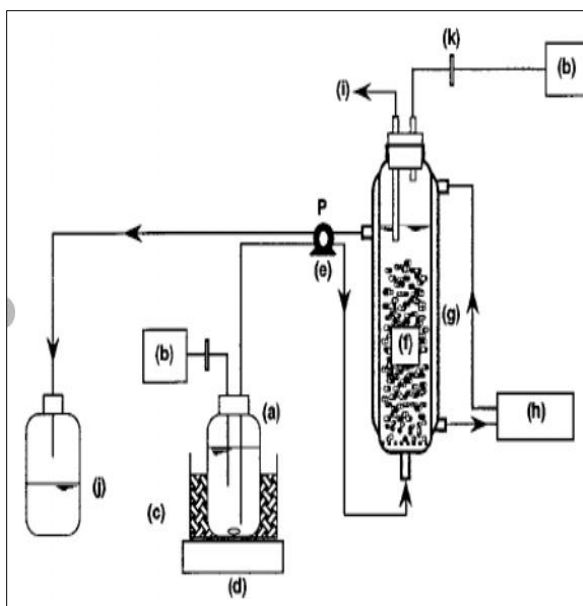


Ilustración 8. Reactor tipo UAF. Bainotti, A, et al (2000). A. depósito de medio fresco. B. Bolsa de gas. C. Baño de hielo. D. Agitador magnético. E. Bomba de entrada-salida. F. Reactor UAF. G. Reactor chaqueta (30°C). H. Baño de agua y recirculación. I. Puerto de muestreo.

Tabla 4. Comparación de digestión anaerobia de lactosuero de los biodigestores en su estado de mayor productividad. Fuente: Fernández, Et al, (2016)

Tipo de reactor	T (°C)	Carga orgánica	Rendimiento/producción volumétrica	Conversión materia orgánica (%)
UASB	35	4,5-38,1g DQO/L	9,6L CH ₄ /Ld	98
UAF	35	1,4g DQO/Ld	280L/kg DQO	80-90
CSTR	55	2.750DQO/Ld	350l CH ₄ /Kg DQO	94,6

2.7 Factores asociados a la productividad del biodigestor

Dentro de los elementos a analizar para la puesta en marcha de un sistema de generación de biogás también se deben tener en cuenta los descritos a continuación:

2.7.1 Parámetros matemáticos

Este parámetro permite evaluar la generación de biogás en un biodigestor y la productividad de metano o productividad metanoica, que consiste en la cantidad de metano generado en la unidad de tiempo con relación a la materia ingresada en el reactor. De esta forma, la siguiente expresión matemática permitiría calcular el rendimiento de metano de un determinado volumen orgánico en un tiempo dado, y se muestra a continuación, (Sogari, N 2003, p. 1):

Formula 1:

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V_{reactor} * t}$$

Donde V_{CH_4} es el volumen de CH_4 que se genera; $V_{reactor}$ es el volumen de materia que se dispone en el fermentador y t es el tiempo considerado. Generar CH_4 , se limita por la naturaleza de la materia orgánica utilizada en el biodigestor. Para estimar la generación máxima de generar CH_4 para un producto determinado se utiliza la siguiente formula:

Formula 2:

$$M_{Max} = \frac{V_{CH_4}}{S_{org_total}}$$

Donde V_{CH_4} es el volumen de CH_4 que se genera S_{org_total} es la cantidad de materia orgánica total utilizada en todo el proceso. Posteriormente se ahonda acerca de la influencia, en el rendimiento de los biodigestores, a partir de factores químicos como la composición y la combinan de sustratos, la adición de grasas y la presencia de inhibidores. (Sogari, N 2003, p.1)

2.7.2. Factores químicos

De acuerdo con lo expuesto por Rivas, O, et al (2011), estos serían los parámetros químicos a tener presentes:

Composición química del sustrato

Algunos sustratos resultan ser mejores de la digestión anaerobia en biodigestores, dichos sustratos son la materia orgánica húmeda que proveniente de la producción agrícola, industrial, doméstica y municipal; también se consideran otros sustratos como el excremento de origen humano y animal. Los desechos que provienen de las fases de producción de la industria alimentaria son excelentes sustratos para la digestión anaerobia, ya que no incluyen contaminantes patógenos, o contaminantes como metales pesados.

Adición de grasas

Debido a su composición química las grasas vegetales tienen un alto potencial energético y un alto contenido de lípidos degradables por las bacterias anaeróbicas; cuando estas se añaden a los reactores pueden acrecentar hasta en un 2400% la producción de biogás.

Inhibidores de la producción de biogás

Es importante tener en cuenta que si la proporción de nitrógeno aumenta la generación de biogás puede reducirse en mayor parte por la formación de amonio, aparte del amonio libre, el sulfonato linear del alquilbenceno (LAS) es el surfactante aniónico más presente en productos de limpieza de hogares e industrias; la proporción carbono-nitrógeno debe conservar una relación entre 20 y 30 partes del primer elemento por cada parte del segundo. En gran parte de los digestores, la adición de surfactantes origina una reducción de la tasa de obtención del biogás. (FAO 2011, p.42).

2.7.3 Factores físicos

También en su estudio Rivas, O et al. (2011), advierte acerca de los siguientes parámetros físicos mencionados a continuación:

Temperatura

La biodigestión anaerobia puede darse en un amplio espectro de temperaturas que van desde los 5°C hasta los 60°C. Al interior del reactor las bacterias metanogénicas son más susceptibles a la temperatura que los demás microorganismos, debido a su lenta velocidad de crecimiento. El proceso de digestión anaerobio se beneficia si la temperatura aumenta en unos pocos grados; no es así, cuando se presenta una variación decreciente, ya que retarda la producción de metano, sin embargo, no perjudica la actividad de las bacterias acidificantes, lo que crea un exceso en la acumulación de ácidos y un potencial problema en

el biodigestor. Es por ello, que se debe propender por la conservación un microclima cálido para lograr una tasa de producción alta de biogás.

Remoción de proteínas de los lodos

Por medio de la desintegración de lodos y la producción de biogás mejora en forma significativa el contenido de metano en el biogás generado a partir de lodos desproteinizados, cuyo aumento se registró de 55,6% (v/v) a 74,8%. Esto gracias a que entre el 40% y el 50% del peso seco de una célula microbiana concierne a las proteínas que forman amonio. Como se dijo antes el amonio libre inhibe la obtención del biogás siendo perjudicial para las bacterias encargadas de la metanogénesis.

Separación de fases

La fracción de biomasa que es transformada a metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) es de, cerca del, 70%. Para que éste se acreciente, se requiere una separación de las fases que forman la digestión anaeróbica de la materia orgánica; ellas son, la hidrólisis (degradación de compuestos orgánicos complejos en compuestos simples), la acidogénesis (obtención de ácidos grasos), la acetogénesis producción de acetato) y la metanogénesis (generación de metano). De este modo se puede optimizar las condiciones del pH y de la temperatura en cada etapa del proceso (2011, p, 43)

2.8 Condiciones para la viabilidad de un proyecto de biogás

Una vez definidos el tipo de biodigestor, su configuración y los parámetros químicos, físicos y biológicos del suero lácteo, se deberá precisar en la viabilidad del proyecto.

En este sentido indica Hernández, F, en su libro denominado “Biogás: 10 casos de éxito en el sector industrial”:

La viabilidad de la instalación de un sistema de biogás está determinada por aspectos técnicos, económicos y productivos. Básicamente, se debe considerar lo siguiente:

- Obtener acceso a la tecnología de biodigestores, generadores y otros elementos y equipos. También se debe contar con los recursos humanos y capacidad técnica para realizar las instalaciones y mantenimiento de los mismos.
- Efectuar la evaluación económico-financiera considerando costo de equipos y mantenimiento, beneficios por ahorro o venta de energía, por aplicación de biofertilizantes y "competencia" con otras acciones que conlleven lucro.
- Integrar el sistema de biogás a los procesos industriales actuales, sustituyendo (o combinando) con el manejo actual del suero. (2015, p. 37).

Aspectos clave para determinar la viabilidad de instalación de un sistema de biogás, también serían:

2.8.1 Sustrato adecuado

La consulta inicial que el empresario quesero debe hacerse es, si el suero lácteo es adecuado para generar biogás. Aunque el lactosuero puede variar en su estructura de acuerdo al queso que se elabore, el suero de queso en general muestra características que lo hacen adecuado para ser empleado como insumo en un biodigestor con buenos rendimientos de metano por unidad de volumen de suero. Asimismo, es sencillo de manejar y hay un flujo continuo.

Sin embargo, la codigestión ha mostrado una buena alternativa para mejorar la producción de Biogás. La codigestión se refiere a procesos de digestión anaeróbica donde se usan múltiples sustratos después de una selección estratégica basada en sus características. Por lo general, la primera razón para usar la codigestión es el hecho que en algunos casos un sustrato o materia prima no es suficiente para hacer digestión rentable. La codigestión anaeróbica puede considerarse uno de los temas más relevantes en la investigación de la

digestión anaerobia proporcionando diferentes desafíos en la comprensión de los fenómenos, su desarrollo e implementación de procesos. También hay muchas razones técnicas que en algunos casos pueden justificar el uso de dos o más sustratos. En las digestiones anaeróbicas, las relaciones bajas de C / N son un factor importante de limitación al proceso que se puede resolver agregando alto contenido de carbono de fuentes ricas en este elemento como lignocelulósicos (materia seca vegetal) para tener una relación C / N equilibrada. (Martínez-Ruano et al., 2019).

2.8.2 Posibilidad de utilizar co-sustratos o combinación de los mismos:

Es frecuente en los sistemas de biogás recurrir a más de un sustrato como insumo para el biodigestor. Cuantas más opciones de sustratos estén disponibles y accesibles, mayores posibilidades existen de obtener un proceso de biodigestión eficiente, tanto en la producción de metano como en la velocidad de las reacciones. Es por eso, que si se puede aplicar una combinación de sustratos es posible que la implementación de este tipo de sistemas sea más viable.

Se ha demostrado que una mezcla de 50% de lechada de ganado y 50% de suero tiene el potencial energético típico de la codigestión de residuos energéticos de cultivos y ganado. Las tasas de producción de metano, eficiencias de eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO) experimentadas a 35 °C; mostraron que la concentración de metano en el biogás, fue de alrededor del 55%. Las eficiencias máximas de eliminación de DQO y DBO5 fueron del 82% y 90%, respectivamente, logrando un aumento máximo de la producción de biogás del 79% con respecto a la fase de arranque. El resultado de este estudio muestra que la codigestión de un alto volumen de suero (hasta 65% en volumen) es posible sin el uso de productos químicos para la corrección del pH, pero también que este tipo de mezcla tiene un potencial energético similar para Digestión anaerobia como cultivos energéticos como el maíz. (Comino, Riggio, & Rosso, 2012).

2.8.3 Escala

Puesto que existe un número alto de variables a considerar es difícil establecer la escala a partir de la cual un proyecto de biogás puede ser factible. En principio, en condiciones propicias inclusive un proyecto muy pequeño podría ser viable. Hay proveedores que afirman que es necesario un nivel mínimo de 10 m³ de suero por día para determinadas tecnologías. (2015, p. 38).

Capítulo 3. El biogás, almacenamiento y captura

3.1 Biogás y sistemas de biogás

Analizar la producción de biogás ya sea a pequeña escala, no es solamente definir el tipo de reactor, el sustrato y el análisis de los factores químicos, físicos y biológicos que conlleva la selección de un tipo de tecnología.

De acuerdo con Hernández F, (2015), el reactor junto con los procesos y equipamientos extras, componen los denominados “sistemas de Biogás” los cuales tiene diversas configuraciones de acuerdo a la tecnología, al sustrato y a los resultados esperados. De forma general un sistema de Biogás está constituido de todos o de algunos de los siguientes elementos:

- ✓ Compartimiento de pretratamiento que prepara y homogeniza el sustrato (ejemplo pH y Temperatura).
- ✓ Biodigestor
- ✓ Gasómetro que almacena el biogás.
- ✓ Tanque de post- tratamiento y/o de almacenamiento del digesto.
- ✓ Sistema de purificación del Biogás para extraer el ácido sulfhídrico y el agua.
- ✓ Compresor.
- ✓ Generador de energía.

Los sistemas de Biogás más modernos tienen purificadores para extraer el dióxido de carbono para transformar el biogás en biometano, es decir en metano casi puro que podría ser inyectado a la red de gas natural. (Hernández F, 2015, p. 10).

3.2 Sistemas de generación de energía a partir de CH₄ y usos del CO₂

Cabe resaltar que la generación de energía en estos procesos dependerá de la utilización del biogás y su eficiencia mejorara después de realizar la purificación del mismo, es decir cuando la mezcla este enriquecida de metano, que es el compuesto que tiene poder calorífico, por lo cual, el Dióxido de Carbono debe ser removido. (FAO et al., 2011, p. 56).

En esta parte del trabajo se tratarán de forma general algunas de las aplicaciones mediante las cuales tanto el Metano- Biometano presente en el Biogás y el Dióxido de carbono removido, pueden llegar a generar energía.

3.3 Biometano – Otras formas de aprovechamiento en la industria

Las labores de purificación o limpieza del Biogás en donde se descartan elementos y compuestos químicos presentes como son el Dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, nitrógeno molecular, Azufre, vapor de agua y trazas mínimas de otros gases, optimiza el biogás permitiendo que lo citemos como Biometano (FAO et al., 2011, p. 56).

3.3.1 Combustión- producción de calor o vapor

En los lugares o territorios donde los combustibles son escasos, los sistemas pequeños de biogás pueden suministrar la energía calórica necesaria para la actividad de la vida diaria como la cocina y la calefacción agua. Aquellos sistemas de escala pequeña también pueden ser empleados para iluminación. Los quemadores de gas convencionalmente utilizados, se pueden adaptar para operar con biogás, modificando la relación aire-gas. La exigencia de calidad del biogás para quemadores es poca y baja. Se necesita alcanzar una presión de gas de 8 a 25 mbar y mantener niveles de H₂S inferiores a 100 ppm para conseguir un punto de rocío de 150°C.(FAO et al., 2011, p. 56).

3.3.2. Generación de energía eléctrica y/o calor

Las tecnologías mixtas de electricidad y calor, emplean la energía eléctrica y el calor residual generado. Ciertos sistemas combinados producen calor y de forma secundaria producen electricidad; por otra parte, también hay sistemas que generan principalmente electricidad y el calor residual es utilizado para calentar el agua del mismo proceso industrial. En uno y otro, incrementando la eficacia de la actividad en comparación si se empleara el biogás sólo para producir un tipo de energía. Las turbinas de gas (microturbinas, desde 25 hasta 100 kW y turbinas grandes, > 100 kW) se pueden utilizar para la generación de calor y energía, con una eficiencia semejante a los motores de encendido por chispa y con un bajo mantenimiento. No obstante, los motores de combustión interna son comúnmente de mayor uso en este tipo de aplicaciones. (FAO et al., 2011, p. 56).

3.3.3. Integración a la red de gas natural

El biogás puede ser implementado en la red de gas natural, esto se debe a que el gas natural está compuesto principalmente de metano. Sin importar el componente que opere con gas natural, a su vez cualquiera puede operar con biogás sin precisas ninguna modificación importante El upgrading a biometano y posterior inyección en la red de gas natural aumenta de forma exponencial el mercado del biogás, debido a que los usuarios de gas natural, como es el caso de centrales eléctricas, industrias y hogares, obtienen acceso a gas renovable. La inyección de biogás en la red de gas natural facilitaría, en muchos casos, una mayor seguridad de suministro y una menor dependencia de las importaciones (como sucede en Europa), además de ayudar a los objetivos establecidos a cerca del manejo de las energías renovables.(González, J, 2019, p 28)

3.3.4 Combustible para vehículos

El uso del biogás en vehículos ha sido probado y se ha empleado desde hace bastante tiempo. Para ello, el biogás debe estar a punto en calidad al gas natural, para usarse en vehículos que se han modificado para operar con gas natural. La mayoría de estos vehículos son acondicionados con un tanque de gas y un sistema de suministro de gas, además del sistema de gasolina normal de combustible.

El biogás puede ser empleado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diésel. El gas generado por la fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy apropiado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, una desventaja puede ser baja velocidad de encendido.(FAO et al., 2011, p, 56).

3.3.5 Celdas o pilas de combustible

Para los autores del proyecto Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables- Manual del biogás FAO et al. “Las celdas de combustible se consideran las plantas de energía a pequeña escala del futuro para la producción de electricidad y calor con una eficiencia superior al 60% y bajas emisiones” (2011, p. 56).

Existen dos tipos de celdas de combustibles en las que se ha centrado la mayor parte de las investigaciones debido a su potencial para el desarrollo de sistemas de energía las cuales son PEMFC y SOFC, a diferencia de la primera las SOFC son capaces de trabajar con varios combustibles como el gas natural y el biogás. (Rangel, V. Niño, A. Ornelas, R 2017, p. 63).

Las Celdas de combustible de óxido sólido SOFC's (solid oxide fuel cell) hacen parte de una clasificación especial de las celdas de combustible, como su nombre lo indica, emplea un electrolito de óxido sólido (cerámico), que lo hace resistente a reacciones presentes a altas temperaturas, conformada por dos electrodos: el ánodo y cátodo, por medio del cual se lleva a cabo una reacción electroquímica debido a un intercambio de electrones entre el hidrógeno y oxígeno para producir electricidad no almacenada. Esta tecnología con alto nivel de investigación es capaz de trabajar con combustible con base carbono sin que se presenten alteraciones en la celda de combustible, además, tiene la flexibilidad de trabajar con variedad de combustible como el gas natural. La viabilidad de estos combustibles radica en la manera como se obtiene el hidrógeno. (Rangel, et al 2017, p. 64).

3.4 Compresión de CH₄ para comercialización

En el artículo presentado por José Souza y Lirio Schaeffer en 2013 con el objetivo de modelar y dimensionar una estación de compresión de biogás a escala piloto estos investigadores lograron demostrar que es posible la construcción de un sistema económicamente viable con tecnologías existentes en el mercado.

De acuerdo con lo descrito por los autores, Souza, J & Schaeffer, L:

El biogás después de una pre-compresión pasa por una filtración para disminución de gases no combustibles ampliando el potencial energético y transformando el biogás en biometano. Parte del biogás es empleado por los motores en los compresores y bombas de los filtros. El biometano obtenido es entonces comprimido para ser almacenado en cilindros y/o utilizado en motores, turbinas y puede ser aún inyectado en gaseoductos.

La preparación para el suministro de biogás/biometano consiste en 4 fases distintas fueron:

- Recibimiento del biogás bruto de la fábrica o birreactores, medición y control del volumen, presión y temperatura;
- Compresión del biogás y suministro a baja presión (4-10 bar);
- Producción de biometano: secado del biogás retirando el vapor de agua, filtración del sulfuro de hidrógeno (H₂S), dióxido de carbono (CO₂) y compresión para abastecimiento a medios (10-40 bares);
- Generación de energía eléctrica con un equipo generador para abastecimiento de la planta y compresión del biometano para abastecimiento a alta presión (40-90 bares).

Las practicas más comunes para el almacenamiento del gas a baja presión son las propias cámaras de biodigestión o gasómetros, globos de vinilo, polietileno de alta densidad (PEAD) y mantas encauchadas; estas formas restringen el manejo de este a

los sitios de producción inviabilizando su transporte. Para las altas presiones la alternativa más asequible es el uso de cilindros o tubos de acero inoxidable; los cilindros proporcionan facilidades en el transporte, almacenaje y manipulación. (2013, P. 5, 6).

Para el uso de biogás en los diferentes escenarios y niveles es necesario diferentes tipos de compresores. La definición del tipo de tecnología depende del nivel de compresión esperado. La tecnología de compresión puede favorecer en el aumento del consumo de biometano y de esta forma favorecer con otras acciones llevadas a cabo para el incremento de biocombustibles en la matriz energética latinoamericana. (Souza, J & Schaeffer, L, 2013, p. 8)

3. 5. Aplicaciones del CO₂

El Dióxido de Carbono- CO₂ es un compuesto de mucha importancia en la naturaleza y es famoso desde los primeros siglos de la humanidad, ha sido utilizado desde mediados del siglo XVIII dando inicio a la refrigeración mecánica; pese a haber sido abandonado y reemplazado por otros compuesto químicos, en la actualidad este compuesto está retomando presencia en el mercado de la refrigeración y climatización a nivel internacional.

Valdés, C & Rozas, C. (2014), expresan: que en la fabricación de hielo seco se produce el célebre efecto Joule-Thompson, por medio de compresiones y expansiones violentas del gas. Inicialmente se licua el gas a una presión cercana a 64 kg/cm² mediante compresores que operan en 3 ciclos, en seguida ingresa a condensadores refrigerados con agua; posteriormente, el líquido se expande a presión atmosférica, por lo que su temperatura desciende. El efecto es la producción de la nieve carbónica (hielo seco), que al extraerse pasa a comprimirse para formar bloques con ayuda mecánica. Este producto se aprovecha en variados procesos industriales, por ejemplo:

- Extintores de incendios: En estos equipos se conserva el gas líquido a presión elevada. Al utilizarse se solidifica en parte formando partículas blancas. Sofoca

esencialmente desplazando el oxígeno del aire del lugar de la conflagración y provoca enfriamiento.

- Criocirugía: EL hielo seco produce temperaturas apropiadas para tratar lesiones cutáneas benignas para las que se requieren temperaturas de -20°C .

- Refrigeración: el hielo seco provee un poder de refrigeración mayor que el hielo común; en el siguiente numeral se trata un poco más el uso del CO_2 en refrigeración industrial.

3.5.1. Refrigeración

Una de las principales características que expone el CO_2 acerca de refrigerantes diferentes es la presión que ejerce sobre la operación, superando a aquellos refrigerantes convencionales y aquellos de nueva generación (aproximadamente diez veces mayor a la del amoníaco, R404A, R134a, R22, R12 y R1234yf). Esta particularidad precisa el manejo de equipos especiales, pese a esto, brinda ventajas que ningún refrigerante tiene. Se convierte en un gas de alta densidad debido a la alta presión, de acuerdo a sus propiedades termodinámicas, permitiendo que se obtenga un efecto refrigerante óptimo con poca masa circulando en el sistema de compresión de vapor. (Belman Flores & Pérez-García, 2013, p. 8).

“Existen tecnologías comerciales para la separación de dióxido de carbono de una corriente de biogás. Entre ellas se distinguen: adsorción, absorción física y química, separación con membranas y destilación criogénica”. (Álvarez N, 2016, p. 8).

El Dióxido de carbono, una vez que se separa, cuenta con diferentes aplicaciones en la industria química, bien sea en estado sólido, líquido, gaseoso, o supercrítico (extracción supercrítica). El dióxido de carbono también se maneja para acrecentar la producción de algunos cultivos en invernaderos. Así mismo se puede beneficiar del gas para el cultivo de algas, con el objetivo de producir biodiesel o algún tipo de biocombustible a partir de esta biomasa. Las nuevas posibles aplicaciones se encuentran en la industria alimentaria, la

industria plástica, industria metalúrgica, las industrias encargadas de elaborar productos de limpieza alternos a los hidrofluorocarbonos, entre otros. También es usado como agente activo en el proceso de producción de carbón activado. Por medio de estas aplicaciones, es viable reutilizar al menos una parte del dióxido de carbono separado y cubrir parte de los costes de la etapa de purificación. (Álvarez N, 2016, p. 7).

3.5.2 Métodos de captura del CO₂

Actualmente la implementación de nuevas tecnologías que permitan el uso del CO₂ se encuentra prosperando con dos objetivos principales: el primero es que contribuya de una manera significativa y sostenible para disminuir las emisiones de CO₂ a la atmósfera y el segundo es el aprovechamiento de CO₂ que se encuentra en cantidades cuantiosas y el cual se puede emplear en diferentes ámbitos industriales, reemplazando otros compuestos con un impacto negativo mayor hacia el ambiente. (Pedraza et al., 2018, p.3). Debido a que las emisiones de CO₂ son resultantes de las actividades industriales, tales como: la elaboración de hierro, acero y cemento, entre otros. La quema de combustibles, están obteniendo mayor poder adquisitivo el uso de energías renovables, la captura y almacenamiento de CO₂ (CCS) y la captura y utilización del CO₂ (CCU). (Pedraza et al., 2018, p.3).

La captura de CO₂ del biogás puede provocar una emisión negativa de CO₂. Dependiendo de cómo se utiliza biogás, existen diferentes rutas para capturar CO₂. Una planta de biogás que utiliza biogás crudo para producir energía y calor se puede adaptar integrando la captura de CO₂. (Li, Tan, Ditaranto, Yan, & Yu, 2017).

Los métodos de captura de CO₂ se clasifican en 3 grupos de acuerdo al método de captura y del punto del proceso donde se realice:

- Pre-combustión: se basa en separar previamente a la combustión del carbono en el hidrocarburo adquiriendo H₂ empleándolo como combustible. Al separarlo se descarboniza el combustible mediante técnicas de gasificación del carbón.

- La oxidación, que consiste en emplear oxígeno como comburente reemplazando el aire. La reacción produce CO_2 y H_2O , estos se separan de manera sencilla mediante condensación del agua, obteniendo de esta forma una corriente de gases con una concentración de CO_2 en torno al 95%, permitiendo la compresión del gas para poder ser transportado y almacenado.

El CO_2 capturado después de la post-combustión es el grupo de técnicas más desarrolladas. Consiste en separar el CO_2 de las emisiones mediante métodos físicos y químicos. (Muñoz, Peris, & Rodríguez, 2011, p. 9)

Con el fin de separar el Dióxido de carbono al momento de la purificación del Biogás proveniente de la digestión del suero lácteo es posible la aplicación de la última tecnología descrita; los proyectos de captura y utilización del Dióxido de carbono son desarrollados a gran escala y tienden a ser costosos, ejemplo de ello, es que la implementación de proyectos CCS han llegado solo a ser 14 en todo el mundo y algunos de ellos se han retrasado debido a la poca inversión económica en Estados Unidos. Por esta razón, el paso que deben dar estos proyectos es comercializar con el fin de que sean financieramente viables. Paralelamente, debe hacerse la implementación de legislación para regular estos mercados (Pedraza et al., 2018).

La adsorción es una de las técnicas que mayor interés ha tenido en la captura del CO_2 , los procesos de adsorción emplean adsorbentes sólidos que capturan de manera reversible el CO_2 . La ventaja de este método de captura es que permite que la energía utilizada para liberar el CO_2 se reduzca comparada con otros procesos. De forma experimental se han empleado como adsorbentes el carbón activado, el gel de sílice, zeolitas y estructuras metal orgánicas (MOFs). (Morales, V, 2016). Tal es el caso de estudio del Colegio de Ingeniería Química, Universidad Forestal de Nanjing-China, (2018), donde se realizó un estudio experimental en la captura y almacenamiento del CO_2 con gel de sílice, el cual es empleado como adsorbente en un proceso de oscilación de presión de vacío que permite capturar el gas. (Tecnología de adsorción VPSA).

Capítulo 4. Recomendaciones para Colombia

4.1 Experiencia industrial de generación de biogás en Colombia

La protección del medio ambiente en nuestro país ha tomado gran relevancia, debido en parte a los compromisos internacionales adquiridos con la firma de diferentes tipos de tratados, así como por la intervención activa en convenciones de la organización de Naciones Unidas de lo cual se deriva su participación en proyectos de adaptación al cambio climático.

Esto ha conllevado a la creación de normas e incentivos por parte del gobierno nacional para promover medidas de PML, basados en direccionar los subproductos, los efluentes y las emisiones; así como en la generación de energía como fuente de autoabastecimiento; de esta forma varios sectores han logrado realizar proyectos de energía a partir de biomasa.

Según Velásquez, M. et al, (2018), lo anterior se suma a la RSE de industrias y agremiaciones que han creado uniones sectoriales con autoridades ambientales; bajo esa articulación institucional la digestión anaerobia ha tomado un lugar importante; el país, cuenta con plantas que generan Biogás, en los sectores: palmicultor, azucarero, avícola, porcicultor, cerveceras, plantas de producción y beneficio animal (cárnicos y sus derivados), etc., algunas con aprovechamiento continuo de Biogás y otras con quema directa; en muchas de ellas no solo se proyectó gestionar los vertimientos aprovechando la energía generada en el reactor anaeróbico sino que además el efluente líquido es empleado como biofertilizante.

En la actualidad Colombia registra un gran potencial de aprovechamiento de biomasa para generación de biogás en casi todos los sectores de la industria agrícola y pecuaria, la producción de Biogás por medio excretas de ganado, porcinos y aves de corral, es un proceso ampliamente reconocido, maduro y de bajo costo para la producción de biogás, es

la forma de aprovechamiento de biomasa más tratado a mediana y pequeña escala incluso conocido a nivel de familias rurales.

La existencia de experiencias a gran escala como en el sub-sector cañicultor particularmente el caso de la organización agroindustrial Manuelita en el valle, es uno de los proyectos de mayor interés; Manuelita diversificó sus operaciones creando valor económico, social y ambiental a través de la gestión eficaz y de calidad de sus residuos, elaborando a partir de ellos fuentes renovables de energía, a través del uso sostenible de sus recursos, con un impacto positivo sobre el bienestar de las comunidades aledañas, el grupo Manuelita pone en venta a la red pública sus excedentes de energía desarrollados a partir de bagazo de caña de azúcar.(Manuelita.com, 2020)

El manejo de residuos sólidos urbanos, para la generación de Biogás por digestión anaerobia es muy reciente en el país, el CONPES 3874 de 2016, contempló como opción de tratamiento la valorización energética de los residuos sólidos urbanos previa a la disposición final y se trazan estrategias para la desincentivar la disposición final de los residuos sólidos en rellenos sanitarios de diversos sectores del país. (Velásquez, M, et al, 2018). Por el momento el relleno sanitario Doña Juana es el único en Colombia que aprovecha el biogás, una vez los residuos empiezan su descomposición anaerobia inicia la producción de biogás, realizándose la captación y conducción del biogás originado hasta la planta en la cual se efectúa la quema de metano y generación de energía.

De estas experiencias mencionadas se puede rescatar, que, Colombia no solo cuenta con el potencial para la generación de Biogás, sino que existen casos de éxito(Grupo Manuelita, Relleno Doña Juana). Las instalaciones de biogás disminuyen la presión que repercute en los bosques como fuente de combustible, el carbón de uso doméstico, leña y madera, reducir la quema de estos materiales favorece la salud de las personas del campo, que se encuentran a exposición directa a la contaminación por emisiones; además, se cuenta con los beneficios sociales y ambientales que ya se han expuesto. (Remáis et al., 2014). Pese a existir normativas, la tecnología necesaria, la manera de acceder a ella, el talento para

adaptar la experiencia de otros países a nuestras regiones, aún no se ha logrado diversificar en todos los sectores y subsectores económicos el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía que permita compensar deficiencias en acceso a la energía y cubrir las necesidades de calor y/o energía en zonas apartadas de la geografía nacional.

Es importante recalcar que en el sector académico años atrás se vienen desarrollado investigaciones en el campo de las fuentes no convencionales de energía y del biogás (Biometano y Biohidrogeno) y que las Universidades juegan un destacado rol, ejecutando proyectos a partir de diferentes tipos biomasa para diferentes sectores, dando solución a los problemas puntuales del sector agropecuario en las regiones de influencia.

Las industrias de alimentos del país también generan biogás mediante las ARI, el aprovechamiento del biogás en este caso proviene de las PTARs que cuentan con procesos anaerobios, como el caso de Alpina, empresa dedicada a la producción de alimentos a base de lácteos, dicha empresa produce biogás para cogeneración. Sin embargo, en el sector lácteo colombiano se emplea el lactosuero como fuente nutricional para la elaboración de otros productos y no se evidencia información respecto a la implementación de proyectos experimentales de generación de biogás a partir de suero lácteo.

4.2 relación del caso colombiano y la generación de biogás en el mundo

Mientras en Colombia, no existe aún, la suficiente diversidad industrial para el explotar todos los tipos de biomasa, entre ellas el suero lácteo, en el viejo continente y China nos llevan por poco más de un siglo de delantera investigando con distintos residuos para generar energía.

Más allá de la imposibilidad de generar energía a pequeña o mediana escala, a base del lactosuero, sería el costo asociado lo que reprimiría llevar a cabo un proyecto, es decir, el montaje de la tecnología necesaria marca grandes inversiones con tiempos de retorno extensos, lo que hace inviable para las PYMEs pensar en autogenerar energía. Otro punto que prevalece es la brecha comercial que separa los países europeos de nuestra realidad, al

hacer una revisión de los casos en donde se ha aplicado la tecnología de digestión anaerobia mediante sistemas de Biogás siendo vencida la relación problemática vs oportunidad, nos encontramos con empresas lácteas con amplia capacidad de producción, por ende grandes capitales y grandes volúmenes de efluentes con lactosuero a tratar, es el caso de industrias de Francia, Holanda, Bulgaria, Austria, Polonia, entre otros, países con tradición quesera en donde se procesan promedio 1 millón de litros de suero año. (Corantioquia & Centro Nacional de Producción Más Limpia, 2016).

Otra variable encontrada en el continente Europeo es la concerniente al manejo y acceso a la información en el área de biogás a partir de suero lácteo, como se mencionó anteriormente la Asociación industrial de alimentos y bebidas Europea, proporciona los datos que permiten conocer el número de plantas que operan actualmente y que tipo de sustrato o combinación se usa en la región. Adicionalmente en Europa ya existen empresas con líneas de negocio especializadas en ofrecer y construir plantas con sistemas de biogás para industrias de quesos. (Hernández F, 2015).

De manera general en los años 2009 y 2015 la presencia de instalaciones de biogás en Europa se extendió de 6,000 a 17,000. El margen de crecimiento en la generación de biogás fue del 9 % por año, con una obtención de 3,032 TWh de electricidad, semejante al 1.9 % del total. Alemania se ubicó en las últimas décadas como el principal promotor del biogás en ese continente, el desarrollo de su infraestructura en biogás empezó en los años 90s y creció ágilmente en el periodo 2006 - 2013. (Oxford, 2017).

Alemania, desde el 1 de agosto de 2014, disminuyó el uso de cultivos energéticos y encamino la industria a partir de materias primas procedentes de los residuos; en 2015 se contabilizaron 10.000 plantas sumando 28.000 GWh / año; mientras la obtención de calor se estimó en 12000 GWh. El gobierno alemán ha establecido como meta introducir seis mil millones de metros cúbicos de Biometano a la red de gas natural para este año (2020); esto equivale a casi siete por ciento del consumo actual de gas natural en este país, para 2030 tiene el objetivo de incorporar diez mil millones de metros cúbicos. Italia, es el segundo, en

Europa, con mayor representación en cuanto a plantas de biogás, del mismo modo que Alemania, cambios en su régimen de incentivos en 2013, con idéntico propósito el de promover plantas de pequeña escala que utilicen biomasa como insumo para generación de energía. En Reino Unido, la información indica que, en 2015, con 90 plantas de generación eléctrica con biogás ascendió a 7600 GWh / año, el equivalente al 2,3% de la producción total de electricidad y la producción de calor fue de 700 GWh. (Oxford, 2017).

En Norte América, Estados Unidos no ha acelerado el proceso de implementación de sistemas de biogás, refieren cerca de 2.200 plantas en marcha, la mayoría para el tratamiento de aguas residuales; se prevé que la perspectiva del potencial de generación de biometano, sea mayor aun utilizando recursos de biomasa de lignocelulosa (recursos forestales) (USDA, 2014). Por su parte Canadá, tiene más de 100 proyectos operativos de biogás que generan electricidad y calor renovables, y cerca de una docena de plantas de gas natural renovable en todo el territorio. El mapa de proyectos de biogás en Canadá muestra mayor desarrollo en provincias como British Columbia, Ontario y Quebec, mayoría de los proyectos son ejecutados por agricultores, municipios y entidades productivas del sector privado. (Canadian Biogás Association, 2020).

En Latinoamérica, no obstante, la mayoría de los países tienen experiencias en cuanto al tratamiento de biomasa, es Brasil el de más desarrollo en la generación de Biogás y sus aplicaciones. Casi la totalidad de las plantas de biogás se encuentran en propiedades agrícolas y en rellenos sanitarios; la mayoría del biogás, es utilizada para cogeneración (electricidad y calor). Brasil ha establecido que la obtención de electricidad por medio de biomasa correspondió al 8.75 % de la producción eléctrica con una capacidad operativa de 12.303 MW e incluye generación térmica con biomasa y con biogás, según información de la Agencia Nacional de Energía Eléctrica (ANEEL) en 2014, en este mismo año se construyeron 3 nuevas plantas de biogás llegando a un total de 25 plantas de biogás conectadas a la red eléctrica. (Velásquez, M, et al, 2018).

Retomando el sector lácteo como fuente de abastecimiento de biomasa y de energía, en Latinoamérica, la empresa Lácteos y Energía de Chile genera biogás con suero de queso utilizando reactores UASB descritos en el capítulo 2 de este trabajo, los cuales, de acuerdo a las experiencias con este tipo de biomasa con los que muestran mayores ventajas. Al suero se le eliminan las proteínas por ultrafiltración para formar un concentrado de proteínas y el permeado con lactosa es dirigido a los reactores. El biogás también se emplea en este caso para cogeneración de electricidad y energía térmica. (Hernández F, 2015).

De todo lo anterior, se concluye que la principal aplicación que se le está dando al uso del biogás es en la cogeneración. Europa ha liderado el mundo en este campo, y así mismo en la aplicación moderna de tecnologías optimizando rendimientos y ampliando su uso a otras esferas comerciales. En Norteamérica no obstante se cuenta con el desarrollo económico, la materia prima y la tecnología ha sido más limitada su implementación; para el resto de los países, especialmente países tropicales centro y Suramérica, existe una oportunidad que considera aprovechar la tecnología, beneficiándose de las experiencias de Europa.

4.3 Posibilidades del sector lácteo colombiano

Colombia cuenta con un acceso a tecnología avanzada, por tener firmados tratados de libre comercio con varios países del primer mundo, pero sigue rezagado en cuanto a la implementación de proyectos de ingeniería en gran parte como ya se dijo por temas económicos, pero de la mano con esto, continua pendiente la innovación de servicios y del mercado energético, en el sector lácteo es una debilidad y oportunidad de mejora. Las tres mayores empresas lecheras de Colombia representan el 0,43% del panorama mundial, de producción láctea y aunque su capacidad parece ser insuficiente, para encarar el mercado nacional se cubre la demanda y se realizan esfuerzos de expansión. El sector lácteo en el país se constituye por microempresas que cubren cerca del 88% del total. Las grandes empresas se componen por muy pocas, algunas de ellas dueñas de procesos productivos que incluyen alta tecnología, mientras que las PYMEs generalmente tienen y conservan procesos artesanales. (Castelletti, O. 2013)

Ante este panorama los pequeños productores lácteos del país a fin de transformar los desbalances económicos en acceso a tecnificación de sus procesos, cuentan con herramientas previstas en las normas agrarias y de ordenamiento territorial, como la implementación de la Política Nacional Competitividad y Productividad del Sector Lácteo. (Castelletti, O. 2013). Esta política busca que se cumplan los objetivos y contribuir con estrategias para que el sector lácteo mejore su capacidad, siempre y cuando exista apoyo técnico especializado que contemple el desarrollo de una estrategia para la formación de conglomerados, tal como se hace en países de primer nivel, con enfoque en territorios y con la intervención de comunidades, corporaciones, gremios y gobierno nacional; para que este último coordine el diseño de las políticas con la ejecución, ya que la distancia y falta de continuidad entre periodos gubernamentales es lo que ha dado como resultado, alta dispersión de políticas, ausencia de priorización y ejecución.

Con base en lo descrito por Castelletti, O. (2013), tomando como caso de éxito Italia, que ha logrado un lugar predominar en el sector quesero conformando diferentes grupos empresariales que promueven la comercialización de este producto. Así mismo se conocen este tipo de alianzas entre productores para realizar la depuración de efluentes en plantas cooperativas y tratar el suero lácteo con fines de generación de energía, ejemplos de estas asociaciones también se encuentran en sectores como el sector agrícola, el ganadero y el porcicultor.

En este sentido la **Asociación colombiana de procesadores de leche**, Asoleche es una organización, que busca facilitar la competitividad de las industrias lecheras de Colombia, (conformada por empresas pequeñas, medianas y grandes, que representan aproximadamente el 80 % del acopio formal de leche en Colombia). Asoleche (2019). Como iniciativa la organización realiza el evento más representativo del sector lácteo, el congreso internacional de la industria láctea (el 9º congreso que se realizó en mayo de 2019 fué el evento referente del sector lácteo en Latinoamérica) donde promueven PYMEs desde los 8 congresos bianuales, siendo la oportunidad de intercambio de conocimientos de diferentes

temas entre ellos lo relacionado al medio ambiente; un espacio propicio para estimular y tener como referente las experiencias de aprovechamiento del subproducto lácteo.

Asoleche juega un importante papel para que las pequeñas y medianas empresas lácteas se enfoquen a la productividad, cumpliendo con los diferentes ejes estratégicos de la organización, uno de sus propósitos es el de liderar el desarrollo sostenible de la cadena láctea del país, mejorar la capacidad científico – técnica de las industrias afiliadas a la asociación, lo que podría llevar a incursionar en conceptos de economía circular, donde el uso del lactosuero para autogeneración pueda aplicarse.

En Colombia y especialmente en la regiones de mayor producción láctea como Cundinamarca, Antioquia, entre otras, los gremios pueden mantener un enfoque mucho más proactivo a favor del fortalecimiento de estas iniciativas, ya que dejar todo en manos de las comunidades locales da lugar a multitud de proyectos pequeños, que desperdician oportunidades de mercado que no conocen, o con poca innovación respecto a lo que se viene haciendo en países con producción energética a partir de la Biometanización, dejar la iniciativa solo a la gran empresa permitiría que surjan algunos proyectos excelentes como sucede en otros subsectores, pero también sesgados para el conjunto de la industria láctea.

Una salida inicial para prevenir los vertimientos de suero lácteo al suelo, redes de alcantarillado y dejar de ser solamente usado como alimento para cría de cerdos, aprovechando su potencial energético consiste en la creación de proyectos pilotos alojados en las mismas regiones productoras, lo que justificaría y financiaría la inversión y garantizaría el manejo de los volúmenes de suero, siendo el flujo del mismo continuo, bajo este mecanismo se relacionarían los intereses de las entidades públicas, el sector privado y la comunidad, contribuyendo con la preservación del medio ambiente.

Otra opción que se puede abrir por la presión normativa en cuanto al manejo de residuos y la gestión ambiental de las empresas proactivas, está dada por el futuro de los gestores de residuos, que es un mercado que cada vez se especializa más aunque igualmente

depende de la legislación y de los avances tecnológicos, dos ámbitos que se complementan y en los que aún hay mucho recorrido por delante.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Respecto a la importancia de la implementación de los sistemas de biogás para el sector lácteo en Colombia, específicamente a partir del suero procedente de la elaboración de queso, es de anotar que pese a existir hace décadas métodos de aprovechamiento de la biomasa en la cual se centra esta revisión documental, en nuestro país, se ha optado por el momento en concentrar esfuerzos en otros sectores industriales; pese a no existir experiencias específicas existen condiciones para realizar simulaciones y proyectos pilotos, en la actualidad las tecnologías a emplear son más accequibles gracias a los tratados de libre comercio y al comercio por internet, se puede tomar como referencia inicial la experiencia de países como Argentina y Chile, donde funcionan plantas de generación de biogás proveniente del lactosuero, y considerar la opinión de expertos investigadores del primero que afirman la existencia de proveedores de tecnologías que pueden lograr producción de biogás con un nivel mínimo de 10 m³ de suero por día para determinadas condiciones; es decir aplicables a pequeñas y medianas industrias.

Lo anterior da luces a la alternativa de aprovechamiento del lactosuero mediante el uso de procesos de digestión anaerobia para la generación de biogás en Colombia, siguiendo la línea de investigación más desarrollada a nivel internacional lo adecuado sería la implementación de sistemas basados en reactores tipo UASB, teniendo en cuenta los pre-tratamientos, adaptación a los volúmenes y a las características de cada efluente a tratar, dominio de la hidráulica del digestor y la separación final del biogás; siendo posible obtener no solo los beneficios económicos representativos, sino también beneficios sociales, las comunidades rurales obtendrían el plus de la energía de primera mano, empleo y tecnificación del agro, y a la par los beneficios para el medio ambiente en los componentes agua y aire.

El biogás obtenido del lactosuero es susceptible de ser aprovechado para cogeneración y sería lo ideal; una vez establecida la viabilidad de la implementación de un

sistema de generación de biogás, la primera alternativa de aprovechamiento del biometano es la producción de energía eléctrica, ya que en la operación es el pago por energía eléctrica el que representa uno de los costos más altos que tienen los pequeños y medianos productores. Inicialmente el consumo de energía sería dentro de la misma industria, pero es posible de acuerdo a la envergadura del proyecto visibilizar y extender su uso a terceros, mediante la venta de excedentes; no es ilógico pensar que la unión de sectores lecheros o zonas de elaboración de producción de quesos y lácteos, o gestores de residuos se diversifiquen y consoliden a futuro empresas que ofrezcan servicios de aprovisionamiento de energía, ingresando a la matriz energética de Colombia dadas las condiciones del mercado ya que la legislación abre esta brecha.

La aplicación de tecnologías de compresión del compuesto de principal interés el CH_4 , también es factible; si bien inicialmente los esfuerzos deben canalizarse a la producción de buenos volúmenes de Biometano, que permitan la tercerización del uso, se debe estudiar en cada caso que tan conveniente (costo-beneficio) podría ser realizar las adecuaciones para adaptar la planta de biogás a diferentes salidas de presión permitiendo el almacenamiento en cilindros para posteriormente ser comercializado; países como Alemania pionero y actualmente líder en la utilización del biogás como combustible cuenta con diversas experiencias en este sentido, se trata de aterrizar a nuestro entorno condiciones técnicas ya probadas para la compresión o para la inyección del metano a la red pública.

Respecto a la captura y uso en la industria láctea del CO_2 generado en el biogás del suero lácteo, se requiere de un mayor periodo de investigación y de avances científicos, ya que para ser viable esta aplicación se debe contar con una fuente abundante, es por esto que los proyectos más significativos en esta área se enfocan en capturarlo postcombustión e involucran grandes capitales; por ahora la recuperación del Dióxido de Carbono de las corrientes de biogás sigue en estudio con la finalidad de disminuir costos tanto del sistema como de la purificación del biogás.

5.2 Recomendaciones

Es aconsejable el trabajo mancomunado de sectores públicos y privados a fin de apoyar el aprovechamiento de residuos de los diferentes sectores industriales a través de la cogeneración a partir del biogás, junto a esos beneficios energéticos explícitos, es preciso proporcionar otro servicio esencial, que es el de la información que lleve a planificar inversiones eficaces en tecnología que sean de impacto local y regional, brindando un mayor apoyo a las PYMEs para contribuir en mayor medida con mecanismos de desarrollo limpio- MDL en el país.

Se deben estimular relaciones donde primen logros armónicos entre el sector industrial, el mediano y el pequeño productor, separando el interés de posicionamiento, ventaja y adquisición económica del mercado, ya que la infraestructura y los servicios públicos surten de alternativas positivas al sector privado.

El marco regulatorio de generación de energía apoyado en la Ley 1715 de 2014, para llegar a zonas no interconectadas y brindar conocimiento respecto a la regulación ambiental en Colombia, abre las puertas para que incluso el pequeño productor lechero se pueda beneficiar de la autogeneración de energía de acuerdo a las circunstancias y factores multidisciplinarios explicados a lo largo del documento.

Bibliografía

- Álvarez, N. (2016). Procesos de adsorción para la captura de CO₂ en corrientes de biogás. Departamento de Energía. Repositorio Universidad de Oviedo, Tesis con mención internacional, URI: <http://hdl.handle.net/10651/40185>
- Arango, A. & Garcés, L. (2007). *Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Producción Más Limpia*, p.2, 8. recuperado de http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/526/1/pl_v2n2_2330_electr ocoagulaci%C3%B3n.pdf
- Arboleda, Y. (2009). *Fundamentos para el diseño de biodigestores*. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/7967/4/luisoctaviogonzalezsalcedo.20121.pdf>
- Arce, J. (2011). *Diseño de un Biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del litoral*. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1593>
- Asoleche. (2019). *Antecedentes, descripción e información del congreso internacional de la industria láctea*. Recuperado de: <https://asoleche.org/congreso-industria-lactea/>
- Ávila, C. (2016). *Uso de biodigestores en la industria pecuaria*. Recuperado de: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/66337/tesina-cav-1016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bainotti, A. & Estébanez, B. & Nagadomi, H. & Nishio, N. (2000). *Production of vitamin B12 in an upflow anaerobic filter continuous reactor using Acetobacterium sp. Biotechnology Letters*. 22. 503-508. 10.1023/a: 1005612819257.
- Biogas Doña Juana S.A.S E.S.P. (s.f). Recuperado de: <http://biogas.com.co/>

- Belman, J. & Pérez, V. (2013). *CO₂ como refrigerante: del pasado al futuro*. Revista Redalyc. Acta Universitaria, 23 (2), 5-12. Issn: 0188-6266. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=416/41627030003>
- Bernd, W. & Rojas, M. & Torres, M. (2012). *Producción de biogás en México estado actual y perspectivas*. Red Mexicana de Bioenergía. Cuaderno Temático No. 5.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2018). *Cómo va el sector Lácteo*. Recuperado de <https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-Lacteo-de-Bogota-Region/Noticias/2018/Julio-2018/Como-va-el-sector-Lacteo>
- Cámara de comercio de Cali. (2016). *Normatividad para las Energías Renovables en Colombia*. Recuperado de: <https://www.ccc.org.co/file/2016/04/Ritmo-Bioenergia-Bioenergia.pdf>
- Comino, E. & Riggio, V. & Rosso, M. (2012). *Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey*. *Bioresource Technology*, 114, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.090>
- Canadian Biogas Association. (2020). *Biogas Projects in Canada*. Consultado en https://biogasassociation.ca/about_biogas/projects_canada
- Castelletti, O. (2013). *Diseño de una estrategia con enfoque territorial, para el desarrollo de la cadena láctea en las cuencas lecheras del Piedemonte Caqueteño y de Ubaté-Chiquinquirá*. 138. Consultado en <https://propais.org.co/wp-content/uploads/ue/informe-final-ue-sector-lacteo-castelletti.pdf>
- Castillo, P (2018), *Desarrollo de un proceso de producción fotofermentativa de hidrógeno a partir de suero de leche*. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental Bogotá, Colombia 2018,

Communauté Université de Grenoble Alpes, INPG École Nationale Supérieure de Physique, Électronique et Matériaux (phelma) Saint Martin d'Hères, France 2018.

Corrales, L. & Antolinez, D. & Bohórquez, J. & Corredor, A. (2015). *Bacterias anaerobias: procesos que realizan y Contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta*. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>

Corantioquia, & Centro Nacional de Producción Más Limpia. (2016). *Manual de Producción y Consumo Sostenible Gestión del Recurso Hídrico Sector Lácteo. Corantioquia*. Recuperado de https://www.sectorial.co/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=110&Itemid=255. [Accessed Septiembre 2015].

Escuela Organización Industrial Sevilla. (2008). *Los vertidos del sector lácteo*. Recuperado de: <https://www.eoi.es/es/file/18145/download?token=t5hptiFc>

FAO, Min Energía, PNUD, & GEF. (2011). *Manual del Biogás*. Proyecto CHI/00/G32, 120. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>

FAO (s.f). *Procesados Lácteos. Queso fresco*. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-au170s.pdf>

FAO. (2011). *Manual 3: Buenas prácticas del manejo de la leche. Procesos para la elaboración de procesos lácteos*. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-bo954s.pdf>

Federación Asturiana de energía Faen. (s.f). *Cogeneración*. Recuperado de: http://www.faen.es/wp-content/uploads/2016/07/Faen_guia_cogeneracion.pdf

Fernández, C. & Martínez, J. & Morán, A. & Gómez, X. (2016). *Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno*. Revisión

bibliográfica. Revista ION, 29(1) ,47-62. issn: 0120-100x. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3420/342046466005>

Foegeding, E. & Luck, P. (2002). *Whey protein products*. 1957-1960. In: Caballero, B., L. Trugo, P. Finglas (eds). *Encyclopedia of Foods Sciences and Nutrition*. Academic Press, New York.

García, B. (2018). *Evaluación estadística y eutrófica de la calidad de agua de un embalse tropical*, recuperado de
<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/27045/Evaluación%20estadística%20y%20eutrófica%20de%20la%20calidad%20del%20agua%20de%20un%20embalse%20tropical.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gonzales, R. (2008). *Metanizacion*. Recuperado de:
<http://www.maestrocompostador.es/Metanizacion/Metanizacion.html>

González, J. (2019). *Biogás y biometano como vectores energéticos*. Escola Politècnica Superior, Universidad de Catalunya [http://hdl. Handle. Net/2183/2417](http://hdl.handle.net/2183/2417).

Hernández, F. (2015). *Producción de biogás con suero de queso. Tratamiento y generación de energía renovable a partir de lactosuero*. Primera Edición
<https://doi.org/22060288>.

Hernández, F. (2015). *Biogás: 10 casos de éxito en el sector industrial: Industrias: curtiembre, láctea, cárnica, golosinas, cervecera, destilería de whisky, vitivinícola, procesamiento de verduras y frutas y papelera*.
<https://books.google.com.co/books?id=-1tibaaqbaj&lpg=pp1&pg=pa3#v=onepage&q&f=false>

- Huggins, R. (2016). *Energy Storage Fundamentals, Materials and Applications* Second Edition Department of Materials Science and Engineering University Stanford, CA, USA ISBN 978-3-319-21239-5 (eBook) DOI 10.1007/978-3-319-21239-5
- Jelen, P. (2003). *Whey processing. Utilization and Products*. 2739-2745. In: H. Roginski, J.W. Fuquay and P.F. Fox (Eds.). *Encyclopedia of Dairy Sciences*. Academic Press, London, UK.
- Juliano, P et al. (2017). *Valorización del lactosuero*; compilado por Graciela Blanca Muset; María Laura Castellls; prólogo de Pablo Juliano; Graciela Blanca Muset. - 1ª ed. - San Martín: Instituto Nacional de Tecnología Industrial - INTI, 2017. Libro digital, PDF. Recuperado de file:///D:/Documentos/biogas%20CH₄/lactosuero.pdf
- Landeros, C. & Sánchez, O. (2012). *De los fuegos fatuos al biogás*. Recuperado de: Revista de divulgación científica y tecnológica de la universidad veracruzana <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol25num1/articulos/fuegos/>
- Li, H. & Tan, Y. & Ditaranto, M. & Yan, J., & Yu, Z. (2017). *Capturing CO₂ from Biogas Plants*. *Energy Procedia*, 114(November 2016), 6030–6035. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1738>
- Márquez, R. & Ramírez, V. (2009). *Un modelo de simulación de la Producción de quesos madurados*. *Agroalimentaria*, 15(28), 107-122. Recuperado de: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-03542009000100010&lng=es&tlng=es
- Martínez-Ruano, J. A., Restrepo-Serna, D. L., Carmona-García, E., Giraldo, J. A. P., Aroca, G., & Cardona, C. A. (2019). *Effect of co-digestion of milk-whey and potato stem on heat and power generation using biogas as an energy vector: Techno-economic*

assessment. Applied Energy, 241(October 2018), 504–518.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.005>

MinAgricultura. (2018). *Cadena Láctea Dirección de Cadenas Pecuarias, Pesqueras y Acuícolas*. Mayo de 2018 recuperado de

<http://sioc.minagricultura.gov.co/sicla/Documentos/2019-03-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). (2002). *Guía ambiental para la formulación de planes de pretratamiento de efluentes industriales*. Recuperado de

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005574/cartillas/efluentesindustriales/Efluentesindustriales1.pdf>

Morales, V. (Marzo de 2016). *Estudio de adsorbentes potenciales para la captura de dióxido de carbono*. Recuperado de

<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/65616/Tesis%20Vidal.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Muñoz, C. B., Peris, P. M., & Rodríguez, J. D. (2011). *Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO*. En Ficem.Org.[http://ficem.org/CIC-](http://ficem.org/CIC-descargas/espania/Estado-del-arte-de-las-tecnologias-de-captura-y-almacenamiento-de-CO2-en-la-industria-del-cemento.pdf)

[descargas/espania/Estado-del-arte-de-las-tecnologias-de-captura-y-almacenamiento-de-CO₂-en-la-industria-del-cemento.pdf](http://ficem.org/CIC-descargas/espania/Estado-del-arte-de-las-tecnologias-de-captura-y-almacenamiento-de-CO2-en-la-industria-del-cemento.pdf)

Nanjing Forestry University, China (2018). *The removal and capture of CO₂ from biogas by vacuum pressure swing process using silica gel*. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221298201830341X?via%3Dihub>

- Oxford. (2017). *Biogas: A significant contribution to decarbonising gas markets*. Obtenido de <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wpcontent/uploads/2017/06/Biogas-A-significant-contribution-to-decarbonising-gasmarkets.pdf>
- Oxford Institute for Energy Studies. (2017). *The future of gas in Decarbonising European Energy Markets: the need for a new approach*. Obtenido de <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2017/01/The-Future-ofGas-in-Decarbonising-European-Energy-Markets-the-need-for-a-new-approachNG-116.pdf>
- Panesar, P., Kennedy, D. Gandhi and K. Bunko. (2007). *Bioutilisation of whey for lactic acid production*. *Food Chemistry*. Recovered from Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814607002816>
- Parra, R. (2010). *Digestión anaerobia de lactosuero: efecto de altas cargas puntuales*. Rev. Fac. Nac. Agron. Medellin, v. 63, n. 1, p. 5385-5394, June 2010. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472010000100014&lng=en&nrm=iso. Access on Apr. 2020.
- Parra R. (2009). *Lactosuero: importancia en la industria de alimentos*. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v62n1/a21v62n1.pdf>
- Pedraza, J., Martínez, L., Suarez, L. A., Rojas, N., Ramírez, H., Mejía, A., Casallas, J. (2018). *Capturando el CO₂: De la industria para la industria*. Innovación y Ciencia, 1(June), 1–8. <https://doi.org/2590-8537>
- PNIEC 2021-2030 (2019). *Plan nacional integrado de energía y clima*. Gobierno de España – Unión Europea.
- Pérez, J. & Aldana, G. (2013). *Modelación física de un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA)*. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del*

Zulia, 36(2), 153-163. Recuperado en 16 de abril de 2020, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702013000200007&lng=es&tlng=es.

Prado, D. (2013). *Valoración de impactos ambientales generados en la industria láctea y Cárnica en la ciudad de la Cuenca*. Universidad del Azuay. Recuperado de: <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3265/1/10039.pdf>

Quintero, E. (2012). *Evolución y desarrollo del sector lácteo en el país*. Recuperado de: http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/316/1/Cadena_lactea.pdf

Raffo-Durán, J., y Figueredo-Cardero, A., y Dustet-Mendoza, JC (2014). *Características de la hidrodinámica de un bioreactor industrial tipo tanque agitado*. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 13 (3), 823-839. ISSN: 1665-2738. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=620/62035738015>

Rajinikanth, R., Ramirez, J. Steyer, I., Mehrotra, P., Kumar, R. Escudie and M. Torrijos. (2008). *Experimental and modeling investigations of a hybrid upflow anaerobic sludge-filter bed (UASFB) reactor*. Water Science & Technology. Retrieved https://www.academia.edu/11036777/Experimental_and_modeling_investigations_of_a_hybrid_upflow_anaerobic_sludge-filter_bed_UASFB_reactor

Ramírez, J. S., Solís, C. A., & Vélez, C. A. (2018). *Tecnología de membranas: Obtención de proteínas de lactosuero*. Entre Ciencia e Ingeniería, 12(24), 52-59. <https://dx.doi.org/10.31908/19098367.3815>

Rangel, V., Niño, A., Ornelas, R. (2017). *Panorama general de las celdas SOFC en la generación de energía eléctrica*, recuperado de http://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Aplicacion_Cientifica_y_Tecnica/vol3num7/Revista_de_Aplicacion_Cientifica_y_Tecnica_V3_N7_6.pdf

Red Mexicana de Bioingeniería A, C. (2012). *Producción de biogás en México*. Recuperado de: <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT5.pdf>

Remáis, Justin & Hess, Jeremy & Ebi, Kristie & Markandya, Anil & Balbus, John & Wilkinson, Paul & Haines, Andy & Chalabi, Zaid. (2014). *Estimating the Health Effects of Greenhouse Gas Mitigation Strategies: Addressing Parametric, Model, and Valuation Challenges. Environmental health perspectives*. 122. 10.1289/ehp.1306744.

Reyes, E. A. (2017). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos*. Recuperado de; <https://revistasnicaragua.net.ni/index.php/RCientifica/article/view/4083/3962>

Rivas Solano, O., Faith Vargas, M., & Guillén Watson, R. (2011). *Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad*. Revista Tecnología en Marcha, 23(1), 39–46. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/oai

Ruiz, E. (2017). *Diagnóstico ambiental-Industrial y guía ambiental para las industrias lácteas*. Universidad Libre. Recuperado de: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10917/Cuerpo%20del%20proyecto.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Secretaria Distrital del Habitar. (s.f). *Ley 607 del 2001*. Recuperado de: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=4449>

Secretaria Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor. (2003). *Decreto 3683 de 2003*. Recuperado de: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=11032#0>

- Sogari, N. (2003). *Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos*. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Universidad Nacional del Nordeste, (2), 2–5.
<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2003/comunicaciones/07-Tecnologicas/T-027.pdf>
- Souza, J & Schaeffer, L (2013), *Sistema de compresión de biogás y biometano*, Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642013000600002
- Unidad de asistencia técnica ambiental para la pequeña y mediana empresa (s.f). *Ficha técnica del sector de alimentos lácteos*. Recuperado de:
<http://ambientebogota.gov.co/documents/24732/3987435/Reduccion+de+la+carga+c+ontaminante+de+los+vertimientos.pdf>
- UPME. (2018). Proyección de la Demanda de Energía Eléctrica y Potencia Máxima en Colombia. Bogotá. Recuperado de: <http://www1.upme.gov.co/Paginas/default.aspx>
- UPME. (2014). *Ley 1715 de 2014*. Bogotá. Recuperado de:
http://www.upme.gov.co/normatividad/nacional/2014/ley_1715_2014.pdf
- USDA. (2014). *Biogas opportunities roadmap*. Obtenido de U.S. Department of Energy:
<https://energy.gov/downloads/biogas-opportunities-roadmap>
- Valdés, C & Rozas, C. (2014). *Fabricación de hielo y análisis de ciclos de refrigeración por compresión de vapor* <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/1461>
- Vega, J. P. (2014). *Informalidad del sector lácteo en Colombia*. Recuperado de:
<https://www.agronegocios.co/agricultura/la-informalidad-pesa-42-del-sector-lacteo-en-el-pais-y-afecta-a-la-cadena-2737442>

Velásquez M, Martínez M, Guevara P, Vargas J, Castellanos D, Duarte C, Montoya O. (2018). *Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento*. Contrato 001 de 2017 UPME-Unal. Informe Final. 2 1–216. <https://bdigital.upme.gov.co/jspui/bitstream/001/1317/1/Informe%20final.pdf>

Viquez, J (2012). *Conversión de suero lácteo a biogás*, revista informa Sector Agropecuario, Edición No. 60, 2012.

Zamoran, D. (2012). *Manual de procesamiento lácteo*. Recuperado de: https://www.jica.go.jp/nicaragua/espanol/office/others/c8h0vm000001q4bc-att/14_agriculture01.pdf

Resumen analítico especializado-RAE

Tema: Análisis de la digestión anaerobia para el aprovechamiento del biogás proveniente del suero lácteo; uso y aplicación de tecnologías que permitan adaptar gases como el CH₄ y CO₂ en procesos energéticos en la industria láctea de Colombia.

Título: Aprovechamiento energético mediante cogeneración de biogás obtenido del lacto suero.

Autor (es): Cesar Gonzalo Naranjo Peñuela.
Natalia Milena Botero Penagos.

Director: MEng. MSc. Luis Alejandro Duarte Rodríguez.

Fuentes bibliográficas: Se referencias 74 fuentes bibliográficas dentro de las cuales se encuentran: FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF. (2011). Manual del Biogás. Proyecto CHI/00/G32, 120. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>.

Rajinikanth, R., Ramirez, J. Steyer, I., Mehrotra, P., Kumar, R. Escudie and M. Torrijos. (2008). *Experimental and modeling investigations of a hybrid upflow anaerobic sludge-filter bed (UASFB) reactor*. Water Science & Technology. Retrieved https://www.academia.edu/11036777/Experimental_and_modeling_investigations_of_a_hybrid_upflow_anaerobic_sludge-filter_bed_UASFB_reactor
Año: 2020

Resumen:

Los grandes volúmenes de suero lácteo provienen del proceso de elaboración del queso; esta Biomasa sometida a un proceso de biodegradación produce biogás, mezcla de varios gases, principalmente Dióxido de carbono (CO₂) y Metano (CH₄), compuestos que son de gran utilidad. El metano es un gas que ha sido aprovechado a lo largo de los años, la tecnología y el uso de biodigestores se ha venido perfeccionando al transcurrir del tiempo, su uso representa una serie de beneficios en cuanto a: costos por ahorro de energía (cogeneración), beneficios del sector energético nacional, beneficios ambientales al mitigar impactos. Este trabajo busca contextualizar la existencia de grandes dificultades, pero también desafíos en la gestión ambiental de las empresas del sector lácteo colombiano, y apunta a la necesidad de avanzar en la implementación de alternativas técnicas para la generación y autoabastecimiento energético, dejando evidencias de casos internacionales que se pueden aplicar en regiones que encabezan la producción lechera del país como Cundinamarca y Antioquia.

Palabras clave: Biogás, Energía alternativa, lactosa, lacto suero, biomasa, autogeneración, ácido láctico.

Contenidos:

La industria láctea.

- La industria láctea en Colombia.
- Marco regulatorio.
- Procesos de obtención del lactosuero.

Proceso de digestión del suero.

- Digestión anaerobia del lactosuero.
- Nutrientes necesarios para la digestión anaerobia.
- Beneficios de la digestión anaerobia.
- Biodigestores más usados en la industria láctea, procesos y variables para la generación de biogás.
- Digestores.
- Factores asociados a la productividad del biodigestor.
- Condiciones de viabilidad.

El biogás, almacenamiento y captura.

- Biogás y sistemas de biogás
- Sistemas de generación de energía a partir de CH₄ y usos de CO₂.
- Biometano
- Compresión de CH₄.
- Aplicaciones del CO₂.

Recomendaciones para Colombia.

- Experiencia industrial de generación de biogás en Colombia.
- Relación el caso colombiano y la generación de biogás en el mundo.
- Posibilidades del sector lácteo colombiano.

Conclusiones.

Descripción del problema de investigación: El lactosuero es uno de los subproductos más contaminantes de la industria alimentaria, el vertimiento directo por parte de Pymes lácteas genera impactos negativos al recurso hídrico por los vertimientos, estos alteran la composición fisicoquímica del agua, a esto se suma la descomposición materia orgánica (residuos en el recurso hídrico). y las emisiones de GEI que se originan en los procesos productivos de las empresas.

Objetivos

General: Comprender la importancia de la implementación de tecnologías para el aprovechamiento del CH₄ y el CO₂ generados a partir de la biodegradación del lactosuero y su posible aplicación en el sector lácteo del país.

Específicos:

Identificar las alternativas más eficientes de uso del lactosuero mediante procesos de digestión anaerobia para la generación de biogás.

Investigar las tecnologías de aprovechamiento del CH₄ y CO₂ contenidos en el biogás con fines de autoabastecimiento energético y de otros procesos que puedan ser aplicables en la industria láctea del país.

Explorar metodologías emergentes de captura y almacenamiento del CH₄ y CO₂ proveniente del biogás a fin de encontrar otras alternativas más eficientes de aprovechamiento.

Referentes teóricos:

se realiza la consulta de información de diversas fuentes científicas, revistas, entre otros artículos referentes al sector lácteo del país, el lactosuero y su proceso de digestión, la cogeneración de biogás, tecnologías de captura y aprovechamiento, y del sector energético.

Referentes conceptuales:

Se reseña conocimiento que contribuye al análisis de información relevante de las tecnologías aplicables, el potencial de aprovechamiento energético del lactosuero, además, del potencial que tienen los departamentos de mayor producción lechera del país, dando lugar al desarrollo sostenible de la cadena láctea en Colombia.

Resultados

En Colombia no se evidencia información respecto a la implementación de proyectos experimentales de generación de biogás a partir de suero lácteo.

Es importante tecnificar la producción lechera en Colombia y mejorar los estándares de obtención de los subproductos lácteos, lo que conllevará a desarrollar el concepto de la economía circular- 3R (reducir, reutilizar y regenerar).

Una vez tecnificados los procesos, el marco regulatorio colombiano y los incentivos creados por parte del gobierno nacional pueden promover medidas de PML.

El país pese a no tener la suficiente diversidad industrial para el explotar todos los tipos de biomasa, existen varios casos de éxito, lo que demuestra que se cuenta con el potencial para la generación de Biogás.

Es conveniente el trabajo mancomunado de sectores públicos y privados a fin de apoyar el aprovechamiento de residuos de las PYMEs de los diferentes sectores industriales a través de la cogeneración a partir del biogás.

Colombia puede beneficiarse de experiencias de países líderes en la generación de energía por medio del Biogás obtenido de la digestión anaerobia de la Biomasa, adaptando tecnologías a las condiciones de nuestro entorno.

Conclusiones

Existen condiciones para realizar simulaciones y proyectos pilotos de generación de energía por medio del lactosuero; en la actualidad las tecnologías a emplear son más accequibles gracias a los tratados de libre comercio, se puede tomar como referencia inicial la experiencia de países latinoamericanos donde funcionan plantas de generación de biogás proveniente del lactosuero y considerar la opinión de expertos investigadores y de proveedores de tecnologías que afirman que se puede lograr producción de biogás con un nivel mínimo de 10 m³ de suero por día, aplicables a pequeñas y medianas industrias.

Aprovechar el Biogás del lactosuero aportaría ahorro en costos de procesos térmicos de las PYMEs lecheras, lo cual representa beneficios económicos y sociales a las comunidades rurales, que obtendrían energía de primera mano, empleo y tecnificación del agro, paralelamente el medio ambiente en los componentes agua y aire percibiría la reducción de impactos negativos.

Es posible entrever y analizar proyectos viables donde los volúmenes de suero sean aptos para generar energía y poder ofrecer venta de excedentes, si existe la unión de sectores lecheros o zonas de elaboración de producción de quesos y lácteos, o que gestores de residuos se diversifiquen y consoliden a futuro empresas que ofrezcan servicios de aprovisionamiento de energía, ingresando a la matriz energética de Colombia dadas las condiciones del mercado ya que la legislación abre esta brecha.

La aplicación de tecnologías de compresión del compuesto de principal interés el CH₄, también es factible, aunque inicialmente los esfuerzos deben canalizarse a la producción de buenos volúmenes de Biometano.

En cuanto a la captura y uso en la industria láctea del CO₂ generado en el biogás del suero lácteo, se requiere de un mayor tiempo de investigación y de avances científicos para poder ser transformado en refrigerante.